



TITLE:

海上交通計画情報に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

奥山, 育英

CITATION:

奥山, 育英. 海上交通計画情報に関する研究. 京都大学, 1986, 工学博士

ISSUE DATE:

1986-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r5807>

RIGHT:

海上交通計画情報に関する研究

昭和 60 年 9 月

奥 山 育 英

目 次

要 旨	5
1. 序章	7
1.1 研究の背景と目的	7
1.2 論文の構成	7
2. 海上交通流の観測と解析	9
2.1 緒言	9
2.2 海上交通流の観測	9
2.2.1 レーダによる観測	9
2.2.2 写真撮影による観測	9
2.2.3 目視観測	11
2.3 観測データの処理と解析	11
2.3.1 観測データの処理	11
2.3.2 典型的な解析	16
2.3.3 特殊目的の解析	19
2.3.4 広大な水域における海上交通流の観測と解析	25
2.4 結言	32
参考文献	33
3. 船舶の主要寸法に関する解析	35
3.1 緒言	35
3.2 船種分類	35
3.3 解析対象船舶	36
3.4 船舶の主要寸法の解析	43
3.4.1 寸法の関数形	43
3.4.2 主要寸法の分析	43
3.4.3 従来値と見直し値の比較	44
3.5 船舶のマスト高	46
3.5.1 マスト高の考え方	46
3.5.2 海上横断工作物と船舶とのクリアランス	46
3.5.3 データ処理	47
3.6 結言	48
参考文献	48
4. 水路の交通容量モデル	49
4.1 緒言	49
4.2 小交通量モデル	49
4.2.1 概説	49
4.2.2 一方向優先方式	50

4.2.3	同方向優先方式	51
4.3	交通容量と交通容量等価時間	54
4.3.1	概説	54
4.3.2	片道通航水路における交通容量等価時間の定義	54
4.4	大交通量モデル（交通容量に関する解析）	55
4.4.1	概説	55
4.4.2	交互交通方式	55
4.4.3	中間すれちがい方式	56
4.4.4	中間待機方式	57
4.4.5	一方向二待機方式（スエズ運河現状航行パターン）	57
4.4.6	T_{\max} の決定法	58
4.4.7	各代替案における容量の増減	59
4.5	大交通量モデル（待ちに関する解析）	60
4.5.1	概説	60
4.5.2	片道通航水路の待ち合わせモデル	60
4.5.3	数値計算例	63
4.6	結言	66
	参考文献	67
5.	海上交通シミュレーション	68
5.1	緒言	68
5.2	海上交通シミュレーションの展望	69
5.3	ネットワーク・シミュレーション	71
5.3.1	概説	71
5.3.2	ネットワーク・シミュレーションモデル	71
5.3.3	機能の付加	79
5.4	港湾内交通への応用	80
5.4.1	概説	80
5.4.2	シミュレーションの実施条件	80
5.4.3	演算結果と評価	84
5.4.4	シミュレーションの映画化	100
5.5	結言	101
	参考文献	102
6.	大規模埋立工事における工事関連船計画への適用	105
6.1	緒言	105
6.2	工事関連船の海上交通へ及ぼす影響の把握	105
6.2.1	工事関連船の交通量と能力	105
6.2.2	一般船の交通量と運航特性	107
6.2.3	シミュレーションによる影響の測定	110
6.3	狭水道交通に関する考察	113
6.3.1	明石海峡の現況	113
6.3.2	明石海峡の幅方向の利用量	121
6.3.3	基線の利用量の確率分布	122
6.4	一般船舶の航行予測	123

6.4.1	基本的な考え方	123
6.4.2	運航情報伝達の実態	123
6.4.3	航行船舶の実態の把握と航行の予測	124
6.4.4	工事区域外の土運船の航行に関する課題	129
6.5	埋立工事の土運船運航計画手法の開発	129
6.5.1	土運船運航計画情報の作成	129
6.5.2	ケース・スタディ	130
6.6	結言	133
	参考文献	134
7.	水域計画シミュレータの開発と応用	135
7.1	緒言	135
7.2	水域計画シミュレータの開発	135
7.2.1	概説	135
7.2.2	水域計画シミュレータの概要	135
7.2.3	水域計画シミュレータの操作方法	140
7.3	水域計画シミュレータの計画への適用	143
7.3.1	概説	143
7.3.2	マブタブット港建設計画への適用	143
7.3.3	水域施設計画の基準策定の展望	152
7.4	結言	155
	参考文献	156
8.	結論	157
付録 A	解析注文表の記入要領	160
付録 B	重量トン数, 総トン数, 純トン数, 船の全長, 型幅, 満載吃水の関係式	163
付録 C	船型とマスト高の関係	185
付録 D	実態調査による L^2 換算密度とネットワーク・シミュレーションによる 利用率の関連について	190
付録 E	水域計画シミュレータの視覚部	192

海上交通計画情報に関する研究

奥 山 育 英

要 旨

我が国の海運および港湾は戦後飛躍的な発展を遂げた。しかし、海上交通の質的かつ量的な変革および国土の有効利用を目的とした沿岸海域の開発によって、海上交通計画に多くの課題も顕在化するに至った。本資料は、これらの問題の解決のために、従来より多くの、かつ、より正確な計画情報を、より迅速に、計画策定者に与えることを目的として検討された手法をとりまとめたものである。

その内容は、海上交通現象の観測および解析手法の開発、海上交通で主役を演ずる船舶の主要寸法の解析、海上交通容量の理論的決定手法、海上交通現象をネットワークモデルに再現したシミュレーション手法の開発、船舶のミクロな挙動を忠実に再現する船舶操縦シミュレータを利用した水域計画シミュレータの開発である。

Study on Materials for Marine Traffic Planning

Yasuhide OKUYAMA

Synopsis

In Japan, many changes have been effected in the marine traffic according to the increase in traffic volume and the appearance of new-type ships such as V.L.C.C., P.C.C., and so on, including those vessels that carry hazardous cargoes.

This technical note provides marine traffic planners many materials required in their working processes.

They are as follows:

- 1) the survey and analysis of marine traffic,
 - 2) the interrelations among several dimensions of ships,
 - 3) the traffic capacity and vessel conjection in channels,
 - 4) the marine traffic simulation,
 - 5) the berge traffic systems planning in a large-scale reclamation,
 - 6) the development of ship maneuvering simulator for water space planning and its applications.
-

1. 序章

1.1 研究の背景と目的

世界有数の海洋国、海運国であるわが国の事情を反映して、貨物を輸送する船舶の変化は、巨大船、高速船、危険物積載船および大型専用船の建造にみられるように著しい。また、わが国の港湾における入出港船舶隻数も取扱い貨物量の増大に伴って増加し、その結果、東京湾、大阪湾、伊勢湾の三大湾および明石海峡、関門海峡、浦賀水道、友が島水道をはじめとする主要狭水道における海上交通量も増大し、外国と比較してみても非常に多い。このような海上交通の質的かつ量的な変化は、貿易立国であるわが国の経済活動に影響を及ぼし始めようとしている。さらに、沖合人工島や海上空港の建設に代表される大規模埋立事業、大規模工業開発に伴う人工港湾の建設、海浜埋立地を利用した高速道路の建設、およびこれらに付随する架橋・沈埋トンネル・海底パイプラインの建設等、国土の有効利用を目的とした沿岸海域の開発計画によって、海上交通上多くの問題が顕在化するに至っている。

これらの問題の解決は、海上交通の全体像の把握が困難であることから非常に難しい。海上交通と対比される陸上交通をみると、陸上の交通工学は自動車王国アメリカ合衆国や西欧諸国における精力的な研究成果により、学問的に整理されているといえよう。しかし、海上交通工学はまだ日も浅く、日本航海学会においては昭和43年に海上交通工学部会が設立されたばかりであり、日本造船学会においても一部の研究者が数年前から海上交通に目を向け始めた次第であり、公共土木事業を対象としている土木学会においても、海上交通に関する研究はいまだ少なく、陸上の交通工学と比較にならないというのが現状である。これは、航海学会においては操船を中心とした航海術を、造船学会においては船舶性能の追究を、土木学会においては土木施設の建設に重点を置いているからと考えられる。

海上交通工学が陸上交通工学と異なる点は、海上交通は陸上の直線的な交通と比較すると平面的な交通で立体交差が許されないこと、大・中・小と大きさも性能も極端に異なる船舶が混在して同一水域を利用すること、および船舶の操縦に対する応答が非常に緩慢であること等である。このような相違点によって、陸上交通工学で開発された理論や手法の海上交通計画への適用が、著しく困難になっている。さらに、船舶の通航する海域は、交通の場であると同時にヨットをはじめとするレジャーボート等のレクリエーションの場であるばかりでなく、漁船

が操業する生産の場でもある場合が多く、これらの機能とも相互に協調した海上交通計画を策定することが必須であって、海上交通工学の分野は非常に広範囲に及ぶ。

このように難かしく、しかも、比較的、他の学問の分野より遅れて発生した海上交通工学を基にして、海上交通計画を策定することは非常に困難なことである。その困難を乗り越えて、海上交通計画に携わる行政当局をはじめとする関係者は、現在成し得る最善を尽くして海上交通計画を策定せねばならない。

本論文は以上の背景に基づき、海上交通計画を策定するにあたって、従来より多くの、かつ、より正確な計画情報を、より迅速に、しかも安価に計画策定者に与えることを目的として研究してきた手法を集大成したものである。すなわち、本論文は、計画決定の直接的な方法論を扱ったものではなく、計画決定に際して必要な情報、計画情報を計画策定者に与え、より良い計画の策定に寄与することを目的としている。

1.2 論文の構成

海上交通計画策定に必要な計画情報は広範に及ぶが、本論文ではそのうち、海上交通の現状に関する情報、および計画により変化が予想されるときの変化の程度に関する情報を取扱うこととする。具体的な論文の構成は以下のとおりである。

まず、2は海上交通の現状の情報をマクロ的に把握する手法に関する研究を扱っており、陸上交通と異なっている面的な広がりをもつ海上交通流の実態を計画策定者に伝える部分である。

3は、海上交通の主体である船舶の主要寸法に関する計画情報をとりまとめており、ほとんどの海上交通計画において必ず利用される計画情報である。

4は、海上交通における交通容量の問題を取扱う。この場合、陸上におけるように、トラックやバスの乗用車換算当量がたかだか一桁であるのに対し、海上では、長さで100倍、体積では 100^3 倍にもおよぶこともあり、操縦性能も著しく異なることから交通容量を一体化して扱うことは難しい。従来の海上交通容量は、単に隻数だけの場合、船舶の全長を L として、 L 換算当量、 L^2 換算当量、 L^3 換算当量(α はある定数)の場合が一般的であり、目的に応じて使い分けている。ここでは、水路の交通容量を取扱うために、新たに交通容量等価時間の概念を導入する。それを用いて、計画が実現したときに、海上交通が交通容量の面からどのように変るかといった計画情報を作成する。

5は、海上交通流のマクロ評価シミュレーションとして開発したネットワーク・シミュレーションによる計画

情報の作成を取扱う。本章においても前章と同様に、主として容量の問題と船舶の輻輳の問題を扱い、計画が実行されたときの海上交通の変化を予測して計画担当者に計画情報として与えることを目的とする。しかし、前章の理論による計画情報の作成に対して、本章では理論的に解明できない事項についてシミュレーションによって計画情報を作成する。シミュレーション手法の性格上、理論的な取扱いと比較すると、複雑な交通の場に対しても適用範囲が広がった反面、汎用性は減少し、計画ごとにシミュレーションを実行する必要があるが生じる。したがって、ここで開発したシミュレーションは、比較的汎用性を持たせ、しかも性格の異なる多くの海上交通計画に適用可能となるように努めた。

6.は、2.から5.までに述べてきた事項の総合的な計画情報の適用事例として大規模埋立工事における土運船を始めとする工事関連船の海上交通へ与える影響評価についてとりまとめた関西国際空港建設計画における計画情報を取扱う。

7.は、船舶のミクロな挙動を忠実に再現する船舶操縦シミュレータを利用した水域計画シミュレータの開発と応用を取扱う。これは、前章までの比較的マクロな海上交通計画情報に関する研究に対して、それらを補完するためのミクロな海上交通計画情報に関する研究である。実際の船と同様に振るまうシミュレータを利用して、安全面と経済面から従来ではほとんど不可能であった実船実験を、模擬ではあるものの可能とする手法で、今後の研究開発に大いに期待される分野である。

8.は、以上の研究において得られた成果についてとりまとめる。

2. 海上交通流の観測と解析

2.1 緒言

海上交通計画を策定するにあたって、当該海域に関する必要な情報は数多くあげられるが、対象を的確に認識するために、船舶交通流の実態に関する情報は最も有用である。実際、海上保安庁を中心に最近の20年間、全国の主要港湾、狭水道において毎年船舶航行調査が行われてきた。しかし、観測結果の整理・解析は、すべて人の手によって成され、初期の目的である情報を得ると、観測によって得られた大量のデータは、海上交通工学上たくさんの有用な情報を有しているにもかかわらず、生かされずにそのまま放置され、投棄されるのが常であった。すなわち、観測・調査にはじまり各種図面の作成および各種の海上交通特性の解析という一連の過程において、その作業を人力に頼ることから、得られたデータを十分に活用することは、不可能であった。人力による解析は、航跡図、ゲートライン通過隻数図、速力分布図を求める場合がほとんどであり、例外的に単純隻数の密度図を求める程度であった。これらの解析項目に限ってみても、船種別、船型別、方向別、時間帯別、ODゾーン別といったきめ細かい解析をすべて実施することは、不可能であった。密度図の場合においても、与えられたメッシュ内に存在する船舶数を画面ごとに加えあわせて、単純隻数の密度を求めるのが限度であった。しかし、一方では、1.でも述べたように海上交通計画の需要は増加し、海上交通の実態を把握するために海上交通観測の要請は従来にも増して多くなった。

このような背景のもとで、海上交通観測および解析の一連の作業過程の見直しを行い、電子計算機による処理を基本方針とし、これまでの経験・実績を基に、自動化と省力化を目指して各種の機器を導入し、高速・省力化された作業システムの確立を図った。その結果、飛躍的な発展を遂げている情報処理機器を組合せて、観測によって得られた貴重な情報をすべて保存するとともに、必要とする時にはいつでもその情報を活用可能とし、正確にして迅速であり、かつ、省力的でもある海上交通観測および解析システムを開発した。

本章は、観測法、観測した結果のデータの処理法、および解析法を中心に取扱い、つぎに、複数レーダの利用や移動船舶による広域海域の観測法と解析法を取扱う。さらに、従来の海上交通流の観測結果が図面や数値で静的に表示され、本来の海上交通が有する動的情報を完全に喪失していることから、動的情報を得るために試みた観測結果の映画化を取扱う。

2.2 海上交通流の観測

2.2.1 レーダによる観測

これは、発射電波の発信時と障害物による反射電波の受信時の時間差から距離を算定して物体の位置をスクリーン上に表示するレーダを利用し、その画面を定時間隔ごとにモータ・ドライブ・カメラ等で写す方法である。レーダ本体、アンテナ、PPIスコープ、撮影コントロール装置を必要とする。

撮影コントロール装置は、撮影間隔(SHUTTER INTERVAL)を最短10秒から10秒ごとに最長150秒まで、露光時間(SHUTTER TIME)を最短0.5秒から0.5秒ごとに15.5秒まで、同一フィルム上の重ね取り枚数を最高7枚まで可能とする装置である。レーダ像の多重撮影を目的として特別に開発した。

2.2.2 写真撮影による観測

これは、メモ・モーション・カメラ(35mm映画フィルムと同サイズ)、あるいは、最近交通違反の取締りに威力を発揮しているロボット・カメラ(35mmフルサイズ)を利用して海上交通流を観測する方法であり、レーダ装置による観測が不可能な場合に行われる。

おのおのの特徴を述べると、メモ・モーション・カメラは映画撮影機であり機械的安定性は非常に優れているが、その反面、非常に取扱いが煩雑であること、重量が大きく軽便でないこと、フィルム・サイズが小さいことが、ロボット・カメラに対して劣っている。

ロボット・カメラは、機械的に映画用撮影カメラほど精密ではないが、取扱いは非常に容易でありしかも重量も軽く高所作業に適する。フィルム・サイズもライカ・サイズであり、より広い画角をとることが可能である。

ここでは、運輸省第四港湾建設局宇部港工事事務所が行った小型船舶航跡調査(上関)の例を取扱う。これは、狭い海峡における小型船舶の航跡調査であり、調査者はカメラの位置と向きを決めて、航行船舶の撮影を行う。一方では、図-2.1のような地形図にメッシュを描いた図を、調査者のカメラと同じ位置と向きで眺めた景観図を作成しておく。その拡大図面図-2.2をスクリーンとして、観測したフィルムを投影し、船舶の通過したメッシュとそのメッシュ内の位置をスクリーン上の映像から読みとり、それを図-2.1の平面図にプロットして航跡を得るという方法である。なお、映像上の座標値がわかりさえすれば、図-2.1における位置は原理的にわかることから、後述するように図-2.2を省略する方法も開発した。

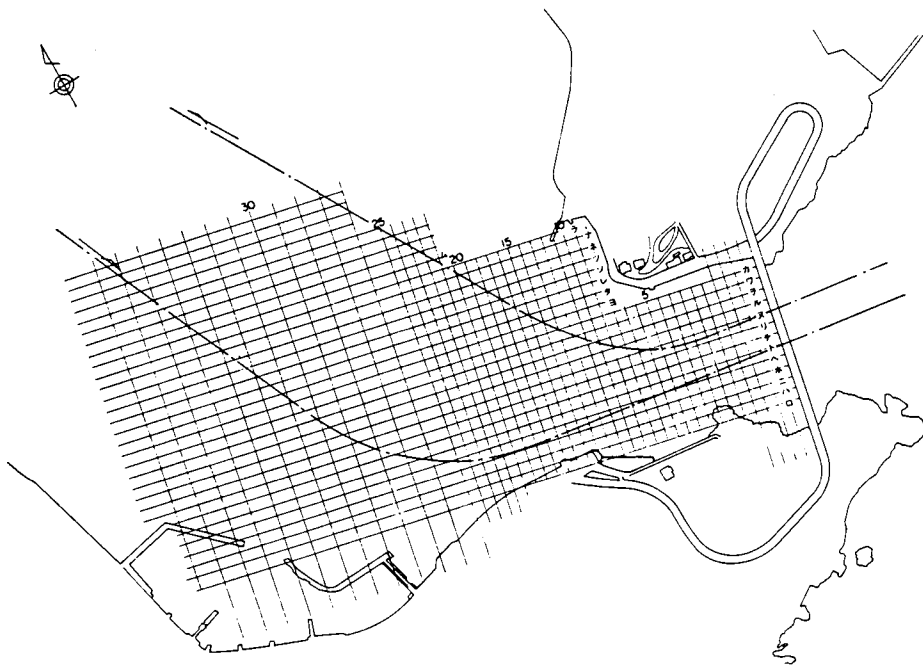


図-2.1 海峡平面図

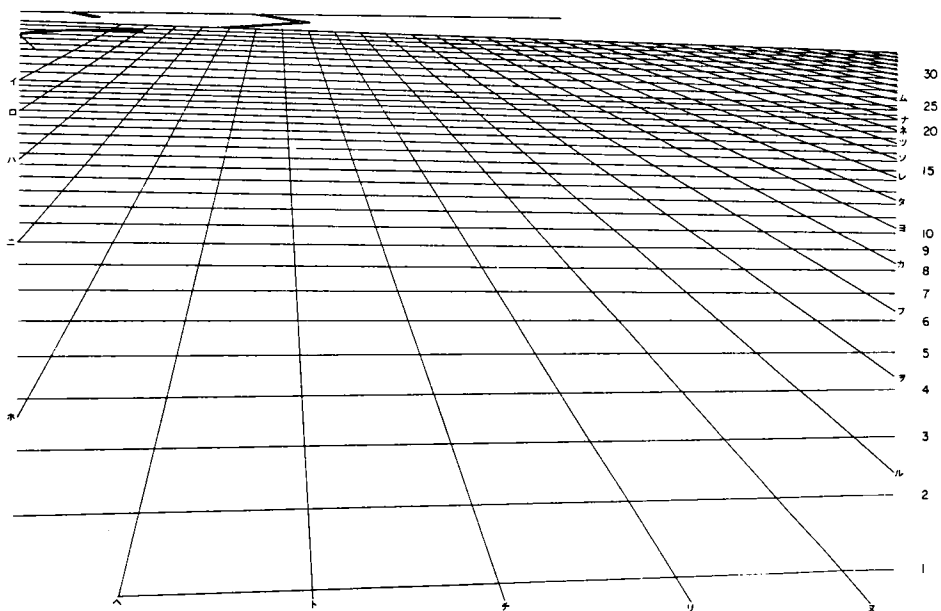


図-2.2 景観図

2.2.3 目視観測

写真撮影による観測においては画像から船種・船型の判別は可能である。しかし、レーダ観測においては画像からだけでは船影が黒い点粒として表示されるばかりで、船種・船型の識別は不可能である。船種・船型を得るためには目視観測を併用する。

目視観測には種々の方法が考えられる。レーダ撮影による観測と併用する場合は、目視で捉えるべき船舶の位置を決定する目視線を設定し、その目視線を通過したときの船種・船型を、通過時刻、方向、概略の通過位置と同時に観測する。

目視観測台帳の一例を図－2.3に示す。この例では、船種・船型を正確に求めるために双眼鏡等で読みとった船名をもとにして、日本船については船舶明細書、外国船についてはロイドレジスターによって、船種、総トン数、船の全長、船幅を求めている。交通量のみを知ろうとする場合は、目視観測だけで十分であることから、単独で実施することも多い。

2.3 観測データの処理と解析

2.3.1 観測データの処理

観測によって得られた膨大な観測データの解析は、作業量による制約から、流線図（船舶航跡図）を描くまでで終わることが多かった。

しかし、観測データには、海上交通工学上、非常に貴重な情報が無尽蔵に含まれている。そこで、それらの貴重な情報を少しも損なうことなく、いつでも容易に利用できるように電子計算機で処理できる形で保存する方法を開発し、そのデータを用いた典型的な解析法を確立した。

データ処理と解析のフローチャートは図－2.4で示される。

観 測 日 誌
5月23日5時 東航 測線N。C

天 候 雲 視 程 2Km
風 向 N 海面状況 静
風 力 弱

船 名	船 種								通 過 時 間 (分)	船 型			通 過 位 置	避 航 関 係	備 考
	貨物船	鉱石船	油槽船	旅客船	専用船	引船	ブリッジ	その他		船型 (1000 G・T)	船長 (m)	船幅 (m)			
VENUS					○				02	2.00	89	13	中		
とくじゆ				○					06	0.08	22	5	近		
はたかぜ									06	0.03	14	4	遠		
大 成 丸									16	0.15	23	7	中		
11三幸丸						○			17	0.07	22	4	近		
天 広 丸	○								31	0.49	54	8	中		
じゆびたあ丸									31	0.19	27	8	遠		
NAMKUNG	○								37	0.50	49	8	中		
新 栄 丸								○	37	0.18	24	6	近		
とくじゆ				○					38	0.08	22	5	近		
せきげう									38	0.20	28	9	近		
1興名丸									54	0.50	49	9	中		
8日洋丸			○						55	0.50	56	9	遠		
3鳳 丸			○						57	0.03	14	3	近		

図－2.3 目視観測台帳の一例

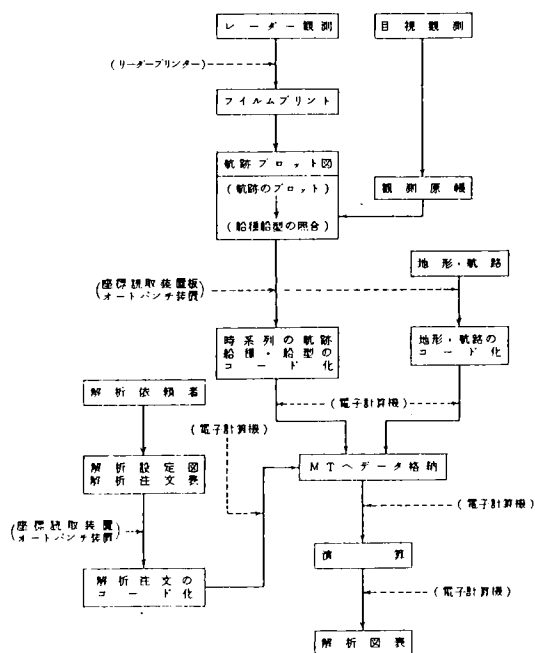


図-2.4 データ処理と解析の流れ図

1) レーダー観測データの処理

レーダー観測データの第1段階の処理は、レーダー撮影装置で得られた観測結果のフィルムと、目視台帳と照合して図-2.5のような航跡プロット図を作成することである。航跡プロット図は、観測によって得られた全情報を有する図であり、航行船舶の各時刻における位置、および船種、船型が記載されている。この航跡プロット図の作成作業が、ほとんど機械化されている一連の解析作業過程においていまだ人力に頼る部分である。航跡プロット図は、航跡が重なって判別できなくなる5船舶前後で1図面とし、次々に作成される。

図-2.5は、来島海峡の例であり、図の左下の四角形内の数字5は5ページの意味である。図中、左上および⑤の右上にある×印は、後のIV)で説明するトンボで、船舶の位置を求める際に利用する基点であり、おのおの、左トンボ、右トンボとよんでいる。

図の右下部には、図中の船舶に対応して、この図にはじめて表われた時刻(日, 時, 分)、船種、および船型(トン階)が記載されている。

図で①の船舶は、①のそばにある○の位置に29日11

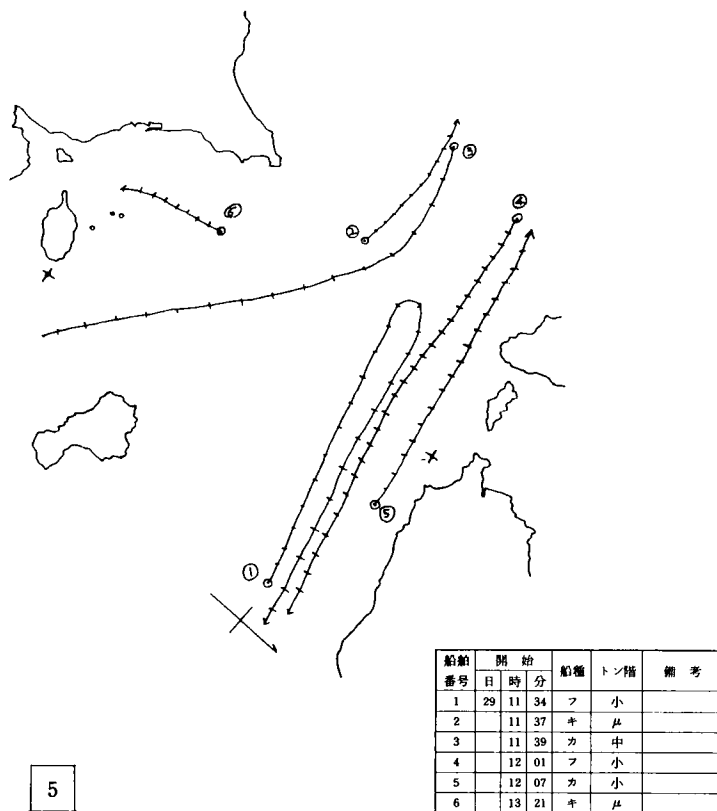


図-2.5 航跡プロット図

4000

3500	3000	全消去									
										消去	
改紙	→	直	→	左	トシボ	→	右	トシボ	→	船番	00
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70		
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80		
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90		
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100		

不明				
ソ				
エ				
オ		不明		
ホ		巨		
ス		大		
フ		中	不明	
リ		小	C	
タ		ミニ	B	南
カ		ム	A	北

図-2.7 コード表のメニュー

IV) 次に航跡プロット図の左側トンボの×印を押し、ひき続いて右側トンボの×印を押す。これは、航跡プロット図の座標をこの二点を基点として絶対座標にするものであり(図-2.8),印刷用語を用いてトンボ(印刷後の用紙の四隅にある+印のマーク)とよぶ。この部分の処置をトンボ合わせといっている。

なお、図-2.7の3000, 4000および1300, 3500の数値は、座標読取装置板上の左下隅を原点とした、横および縦の座標値であり単位は0.2 mmである。

Vi) ひき続いて、トン階をメニュー上で押す。空欄でトン階コードの記入がない場合は不明欄を押す。船種、トン階等は調査が異なるごとに臨機応変に変えている。

()内の数字は電子計算機内で座標値をコードに変更した後の数字コードである。

力 貨物船 (1)

タ タンカー (2)

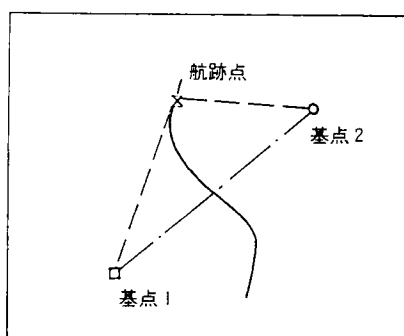
リ 旅客船 (3)

$$\text{フーリエ} \quad (4)$$

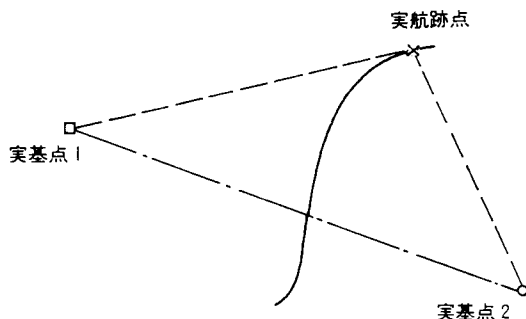
ス	水中翼船	(5)
キ	漁 船	(6)
オ	ブッシャーバージ	(7)
エ	曳航船	(8)
ソ	その他	(9)
	不 明	(10)

船型コード

μ	マイクロ船	～ 20 t	(1)
ミ	ミニ船	20 ～ 100	(2)
小	小型船	100 ～ 500	(3)
中	中型船	500 ～ 3,000	(4)
大	大型船	3,000 ～ 20,000	(5)
巨	巨大船	20,000 ～	(6)
—	不 明		(7)



(座標読取板上航跡)



(実航跡)

(図面が板上で左右にずれたり回転したりしていてもかまわない。基点の絶対固定座標と各図面の基点の座標とからその図面上の航跡座標計算機によって絶対座標系の座標になおされる。)

図－2.8 航跡データの絶対座標の座標系への変換

VIII) 航跡のプロットが終わったら次の船へ移り、上の V) から VII) までを繰り返す。船がつかいたら航跡プロット図をはりかえて、上の I) から VII) を繰り返す。

以上の操作によって、航跡のプロット図の持っている情報はすべてフロッピーディスクに X, Y 座標値として格納される。

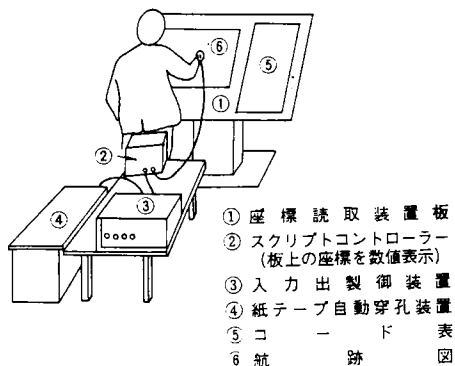
第3段階の処理は、このフロッピーディスク内の座標値を、船種、船型のようにコード化したものについては数値で表わされるコードに戻し、ページ数、船番号、時刻、航跡の座標値のような数値についてはその数値へ戻すことである。このとき、航跡の座標値に関しては左右2つのトンボを基にして絶対座標値に変換する。

この作業は電子計算機によって実行され、最終的にすべての情報は磁気テープに格納される。

上の順で船ごとにプリント・アウトするチェック・プログラムも用意されており、押し方の間違い等をも検出するようにした。

さらに、プロット作業中に間違った場合は、間違いが一点ならばメニューの消去欄をプロットしてから間違いを直して作業を続行する修正機能を設けた。間違いが複数点に及んだり、またはわからなくなったときは、全消去欄をプロットしてからその図を始めからやり直す修正機能を設けてやり直し作業を出来るだけ少なくした。

なお、この座標読取装置は磁わい(歪)を利用しており、0.2 mm まで読むことが可能であり、誤差は0.2 mm 以内で、プロットする速さに格納速力がついていけなくて行われる。なお、図の②、③、④は現在ではパソコンとフロッピーディスクに代っている。



図－2.9 座標読み取り

VII) 次に、船番号に対応する船舶の航跡図を○印から、1つずつ、矢印→までグラフペン等で押していく。

2) 写真観測データの処理

写真による観測の場合には、既に述べたように、メッシュ付きの景観スクリーンを用いる場合のほかに、次に述べるような直接平面座標を求める方法をも採用した。これは、紙テープパンチ機つきの座標読取装置を備えたフィルム・アナライザを利用する方法である。フィルム・アナライザに写真フィルムをかけて、その図の固定点4点の画面上の座標 (x_i, y_i) と、別な平面での対応する4点の座標を (p_i, q_i) とし、これら8数値が既知であると、

i 番目どおしの点 (x_i, y_i) と (p_i, q_i) が同一直線上にありそれら4本の直線が一点で交ること、

(x_i, y_i) の4点が同一平面上にあること、

(p_i, q_i) が同一平面上にあることから、

$$\left. \begin{aligned} x_i a_1 + y_i b_1 + c_1 - p_i x_i a_3 \\ - p_i y_i b_3 = p_i \\ x_i a_2 + y_i b_2 + c_2 - q_i x_i a_3 \\ - q_i y_i b_3 = q_i \end{aligned} \right\} (i = 1 \sim 4) \dots \dots \dots (2.1)$$

の8式が成立する。この8元連立方程式から得た a_i, b_i を用いて (x_i, y_i) ののっている平面上での座標が (x, y) である点の (p_i, q_i) ののっている平面への投影点の座標値 (p, q) は、次式で与えられる。

$$p = (a_1 x + b_1 y + c_1) / (a_3 x + b_3 y + 1) \dots \dots \dots (2.2)$$

$$q = (a_2 x + b_2 y + c_2) / (a_3 x + b_3 y + 1) \dots \dots \dots (2.3)$$

ここで、 (p_i, q_i) を含む平面として地表面をとれば

フィルム面上の座標 (x, y) から、海上面の座標 (p, q) が、メッシュ付き景観図を通すことなく、直接に求められる。

船種、船型、時刻等については、画像に関係ない部分でメニュー方式をとっても、または目視台帳をもとにして別にデータ・ファイルを作成して照合してもよい。

関門海峡の例であるが、写真画面、図-2.10をもとに上式を用いて平面座標におとすと、図-2.11となる。図-2.10は、長尺フィルムを切断するわけにかなかったことから、フィルム・アナライザにトレシングペーパーをあてて描いた図である。

なお、1台のカメラによる写真撮影は、上関の例でも(約40mの高度)、下関の例(約140m)でも、ある程度の高さを必要とするが、適当な高い場所が得られない場合には2台のカメラが必要となろう。

写真撮影による海上交通の観測方法は、港湾内のようにレーダでは近すぎてうまく観測できない場合には、必要不可欠の唯一の方法と考えられる。

以上の手続きを経て、観測データは座標の形でフィルム・アナライザによって紙テープにパンチされる。その紙テープを座標値から各種コードに戻す手続き、さらに航跡の絶対座標を計算してファイル化する手続きは、レーダ観測データの処理と全く同じであり、海上交通実態の観測結果は余すところなく電子計算機で容易に取扱える形となる。

3) データの格納

レーダによる観測結果および併行して実施した目視観測結果、あるいは写真観測結果は、最終的に、1本の磁気テープ内に格納される。その形式は、FORTRANプロ

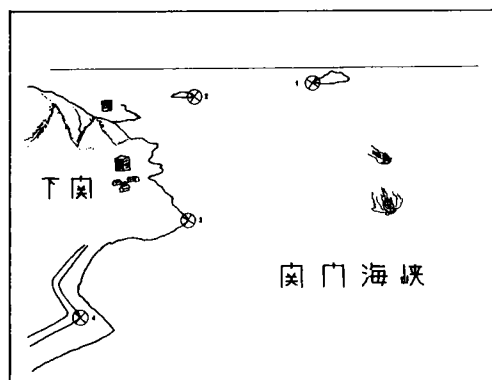


図-2.10 写真画像上の4固定点

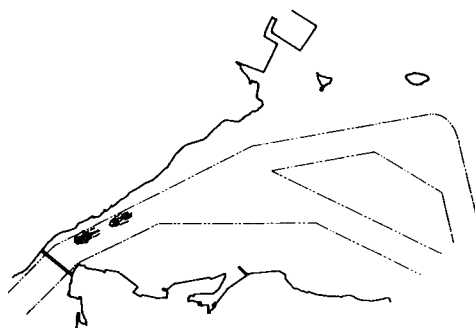


図-2.11 船舶の平面図上に対応する位置

グラムで

```
(K(I), I = 1, 10), (X(I), Y(I), I  
= 1, K(10))
```

の形でおおのの船のコードと船位が格納される。これらの具体的内容は、以下に示すとおりである。

K(1) ……航跡のプロット図の頁
K(2) ……この船のプロット開始日
K(3) ……この船のプロット開始時
K(4) ……この船のプロット開始分
K(5) ……船種（観測ごとにコードが異なる場合あり）
K(6) ……船型（観測ごとにコードが異なる場合あり）
K(7) ……プロット時間隔
K(8) ……航跡プロット図の同一頁の船番号
K(9) ……ダミー（観測に応じて必要な情報に利用する）

K(10) ……航跡プロットの点の数
X(1), Y(1) ……プロット1の船位
X(2), Y(2) ……プロット2の船位

⋮

X(K(10)), Y(K(10)) ……最後のプロットの船位

このオリジナルデータは観測における交通状況をすべて情報として有しており、これをもとにして種々の解析が実行される。プログラムを解析の目的に応じて作成することにより、用意されている解析以外の任意の解析も可能である。

オリジナルデータの格納された磁気テープは9トラックで、ACOS-1000のバイナリーモード、ノーフォーマットで格納される。ユーティリティ・プログラムによって容易に、汎用性の高いIBM形式の磁気テープに変換可能である。

この磁気テープを利用する場合は

```
REWIND u
```

```
n1 READ(u, END=n2)(K(I), I = 1, 10)
```

```
M = K(10)
```

```
IF(M.EQ.0) GOTO n1
```

```
READ(u)(X(I), Y(I), I = 1, M)
```

```
.....  
..... } (ここでこの船舶の処理を行う)  
.....
```

```
GOTO n1
```

```
n2 .....  
..... } 各船の処理が終わってから処理する  
..... } 部分の形にフォートランプログラム  
..... } を書けばよい。
```

K, X, Yは添字付き変数であるから、プログラムの冒頭に

```
DIMENSION K(10), X(500), Y(500)
```

を宣言しておけばよい。また、uは磁気テープをセットする磁気テープをセットする磁気テープドライブのユニットナンバーである。

2.3.2 典型的な解析

ここでは、2.3.1の手段を得てファイル化された航跡データをもとに、船舶航行実態調査を行った際に必ず行う解析を典型的な解析と名付け、その内容を説明する。

1) 航跡図

航跡図(図-2.12)は、既に述べているように別名流れ線図ともいい船舶の航行の跡を線で結んだ図であり、在来の航跡調査の主目的であった。

データが電子計算機で処理できる形となっているので、任意の時間帯、船種・船型その他与えられた条件(例えば、方向別、OD別等)に応じて、航跡図をディスプレイ上に描き、ハードコピーを得、ドラフターにも描くことが可能である。これは、以下の典型的な解析法にすべて共通である。



図-2.12 航跡図

2) ゲートライン通過隻数図

ゲートライン通過隻数図(図-2.13)も、在来の解析法でなじみのものであり、その名の示すとおり、与えられたゲートラインを等分割し、その各ゲートごとの通過隻数を両方向に棒状に示した図である。図-2.14のようにゲートを横切る進入角度による取捨選択が可能である。

また、隻数について、大型船にウェイトをつけて数える。例えば、L換算(Lは全長)、L²換算、および総トン

数換算等、各種換算を行った通過数量を求めることもできる。

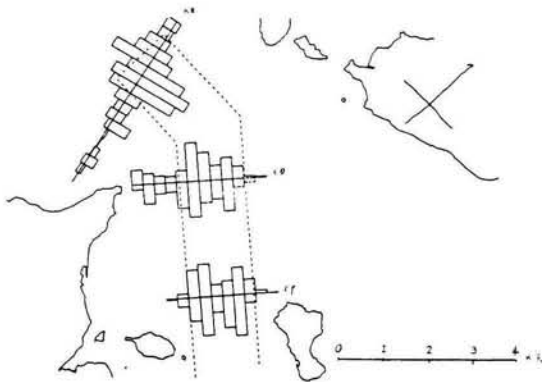
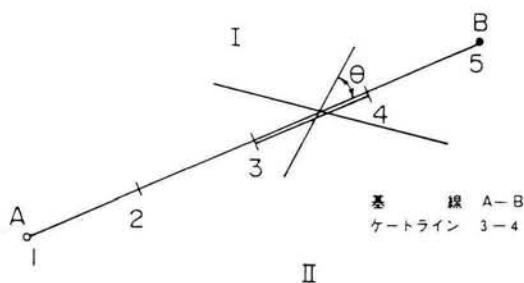


図-2.13 ゲートライン通過隻数図



I側には、IIからIへ横切る船舶を
II側には、IからIIへ横切る船舶を
図示する。進入角が θ (任意)より
小さいものを捨てることができる。

図-2.14 基線とゲートライン

3) 速力分布図

速力分布図(図-2.15)は、ゲートライン通過隻数図と同じように、与えられたゲートラインごとの速力分布

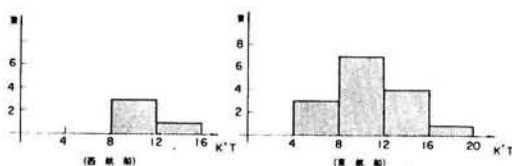


図-2.15 ゲートライン速力分布図

を求めるものである。図-2.15は、図-2.13のゲートラインを通過した時点での速力分布である。

除外進入角も定義できる。

4) 密度分布図

密度分布図(図-2.16)は、水域の船舶航行密度を細かいメッシュごとに求めた図で、通過隻数同様ウェイト付き密度も求めることが可能である。

ここで、密度とは隻で表され、与えられた時間幅内に存在した隻と存在時間との積和を時間幅で除した値である。すなわち、同じメッシュを通過する速力の異なる船の密度への貢献度は、遅い船の方が時間が余分にかかることから大きく効き、速い方が小さく効くのである。

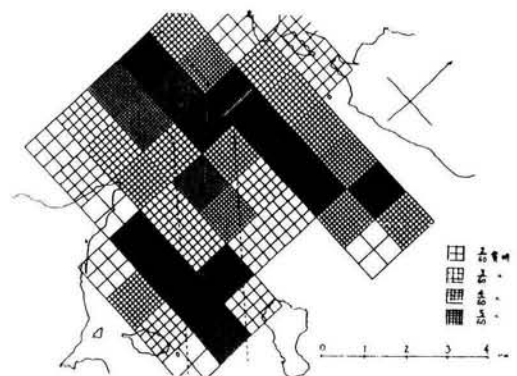
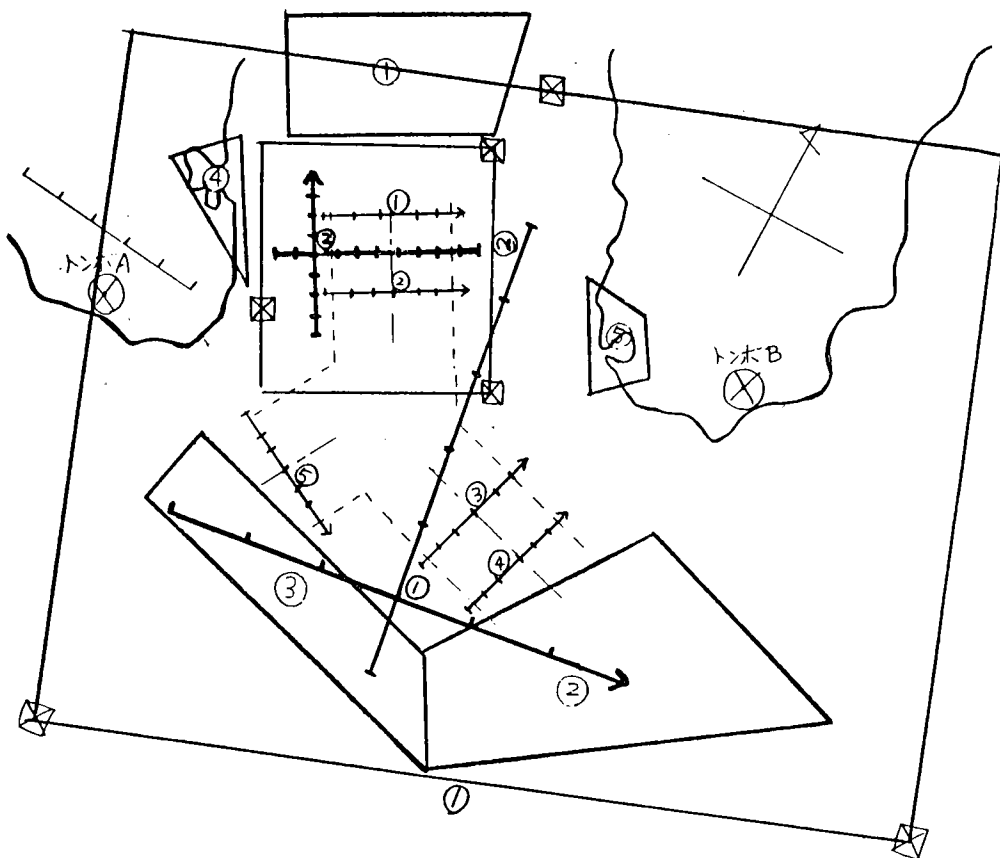


図-2.16 密度分布図

5) 解析指定の容易化

以上1)～4)の他に隻数に関連した幾多のプログラムもあるが、それらはとりたててということもないので省略し、ここでは典型的な解析法における解析指定の容易化と正確化を提案する。

既述したように、航跡データの電算化は、典型的な解析法だけに限ってみても各種の解析が可能であることから、また、別の面から煩雑さが増大し、誤りやすい面も生じてきた。例えば、3日の午後5時と午後8時の間、および……の間の船種が $\times \times \times$ に限って、トン階は $\bigcirc \bigcirc \bigcirc$ で、メッシュを $\triangle \triangle \triangle$ に切って、 L^2 換算の $\square \square \square$ を求めようという具合に注文をつけ、さらに、それらの注文が1海域に数十以上に及ぶこともまれでなくなると、カードでそれらを入力することが、非常に誤りを伴うことに直面した。プログラムは可能な限り汎用性をもたせたので、解析指定のデータカード枚数が多くなり入力方法の改善が要請され、航跡プロット図のメニュー化の考



基準点（トンボ座標原点）の経緯 トンボ座標	北緯	°	'	"	東経	°	'	"
	A				m			m
	B				m			m
または、AB間の距離を入力する。								
ハードコピー枚数（合計）	枚	航跡図			枚			
		密度図			"			
		通隻図			"			
		速力図			"			

図-2.18 解析設定図

2.3.3 特殊目的の解析

1) 概説

航行船舶の時間を伴った航跡データは、2.1でも述べたように、非常に貴重な情報を有しており、海上交通流の実態の解析ばかりでなく、海上交通工学の理論を検証する場合にも、新たに理論を構築する場合にも有効である。また、理論的な扱いが困難な時に行われるシミュレ

ーションにおいて、現実現象へのシミュレート度合をチェックするためにも、また、シミュレーションの入力データの作成にも、航跡データは必要欠くべからざるものである。ここでは、このように典型的な解析とは異なる特殊目的をもつ解析法として数例を提案する。

2) 方向別通過隻数と速度のウィンドローズ表示

これは海域を小領域に分け、その小領域へ入ってくる

船舶の方向別隻数をウインドローズ形式で表示したものである（図－2.19）。方向別隻数であることから小領域は四角形とせずに円形の領域とした。各方向へ突き出した花びらの長さは隻数を、幅はその方向の船舶の1分間に進む距離の平均値すなわち平均速度に近似する値を示している。全体の平均速度は約10ノットであった。

また、中心にある数字は衝突の度合を示す指標で、次のようにして求められる衝突確率に比例する量である。

2船の衝突の割合は、2船の相対速度に垂直な直線上に投影した両船のシルエット幅に比例すると考えられる。²¹⁾そこで、2船の針路差を θ° 、2船の全長をおおの L 、 L' 、船幅をおおの B 、 B' とすると、衝突の割合は両船のシルエット幅に比例することから、

$\theta = 0$ のとき、 $B + B'$ （ただし、速度が等しいときは0）

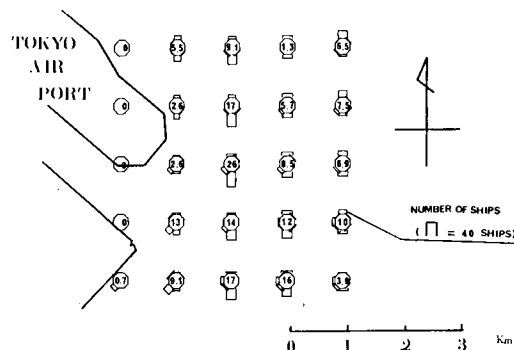
$0 < \theta < 180$ のとき、

$$(L + L') \cdot \sin((180 - \theta) / 2)$$

$\theta = 180$ のとき、 $B + B'$

で与えられる。ここで、 $0 < \theta < 180$ のときは2船の速度がほぼ等しいとした場合である。この値が $B + B'$ より小になるときは、 $B + B'$ とする。

図－2.19は、平均船長を $L = L' = 120$ m、幅を $B = B' = 20$ m、速度が等しいとしてすべての方向について加え合わせた値である。なお、図は昭和50年9月3日12時から4日24時までの間、東京湾内千葉沖に停泊した観測船のレーダによる羽田沖の航跡データを利用した。

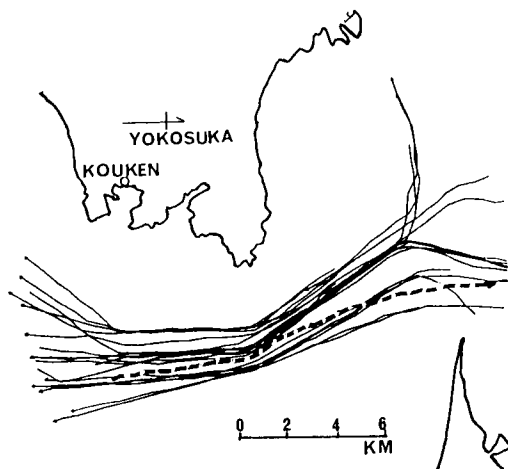


図－2.19 航行船舶の方向別隻数のウインドローズ表示と衝突の可能性の程度

3) 他船の相対航跡

陸上交通に車間距離があるように、海上交通では船舶の閉塞領域がある。これは、例えば、船舶の全長を L とすると、前後方向 aL 、横方向 bL の長円のバンパーを、すべての船がその全長に応じてつけながら、船舶同志がお互いのバンパーにぶつからないように航行するという量である。 a と b を計るには、自船を常に固定し、他船の自船に対する相対航跡図を求めれば計ることが可能である。

浦賀水道で図－2.20のように得られた航跡図における破線で描かれた船舶に着目して、他船の相対航跡図を求めると、行会い船については図－2.21、同航船については図－2.22、横切船については図－2.23のように得られ、これらすべてを1枚にまとめると図－2.24が得られる。この図－2.24は別な観方をする、自船のレーダで撮影したレーダ写真による航跡図である。



図－2.20 航跡図（破線航跡が自船）

一般に大型船のレーダは、ノースアップレーダで、レーダ像は船の船首方向に無関係に一定方向を向くため、そのような船のレーダで得たレーダ像をもとにして航跡図を作成すると、行会いが図－2.25、同航が図－2.26、横切りが図－2.27となり、それらのすべてを合わせた図が図－2.28である。

なお、これらの図で、自船は図－2.21から図－2.24までは図面中央の▶印で、図－2.25から図－2.28は、船首方向は一定でないので中央の＋印で、表されている。これらの船舶は昭和50年9月30日に行った海上保安庁の観音崎の1.3 cm波レーダで観測したもので、太線で示される自船は、12時26分から13時56分までで太線の航跡を描いた。

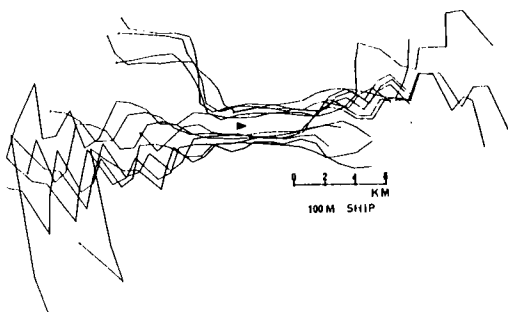


図-2.21 他船の相対航跡（行会い）

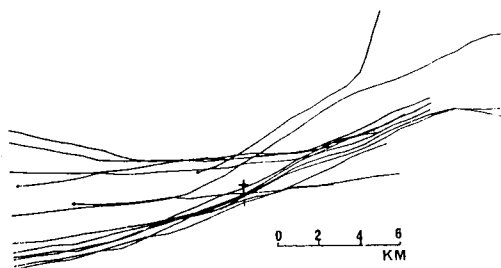


図-2.25 行会い船の相対航跡
（ノースアップレーダの場合）

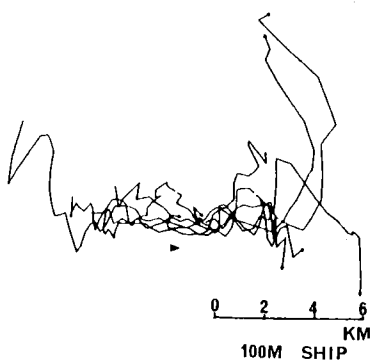


図-2.22 他船の相対航跡（同航）

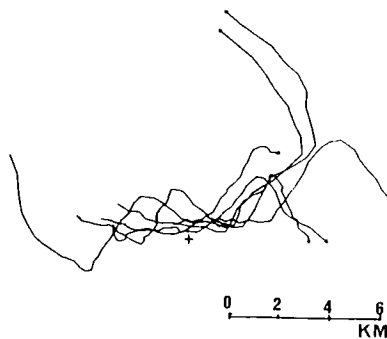


図-2.26 同航船の相対航跡
（ノースアップレーダの場合）



図-2.23 他船の相対航跡（横切り）

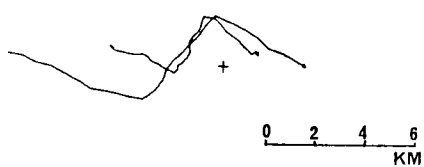


図-2.27 横切り船の相対航跡
（ノースアップレーダの場合）

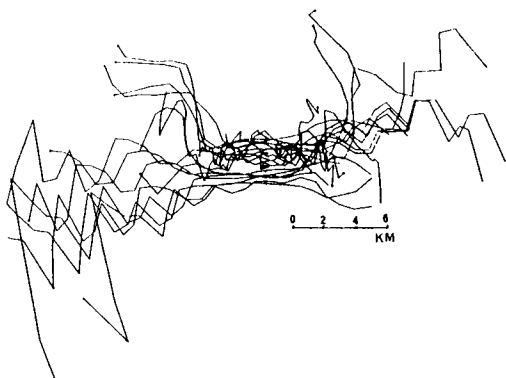


図-2.24 他船の相対航跡

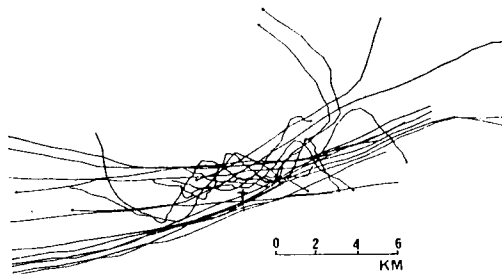


図-2.28 他船の相対航跡
（ノースアップレーダの場合）

また、同航、行会い、横切りの判断は、陸上交通のように線交通でなく、海上では面交通なので、定義が難しく、いまだはっきりと決まった共通の概念が確定していないことから、図-2.29において、自船1の前方に自船を中心とした半径 $R=2,000\text{ m}$ の半円を描き、進路交差角 F が、

$-20^\circ < F < 20^\circ$ のとき	同航
$-160^\circ < F < -20^\circ$ または $20^\circ < F < 160^\circ$ のとき	横切り
$-180^\circ < F < -160^\circ$ または $160^\circ < F < 180^\circ$ のとき	行会い

とした。この場合、自船1の前方にある半円形内で相手船2は刻々と位置が変わり、したがって、進路交差角 F も刻々とかわるので、上の3状態のうち最も時間の長かった状態で出合いを、同航、横切り、行会いとした。

追越しについては、ここで定義した同航のうちで、自船の進行方向に交差する任意に設定した2本の基線を横切る時間を求めておき、その時間に逆転が生じたときに追越しとした。

この定義は、まだ問題があり、数多くの例を調べて多くの人の納得のいく定義を作ってゆかねばならない。

また、3船以上の見合い関係ということばも、現象は誰でも納得するが、一つ一つの具体例に対して明確に区別できる定義もないのが現状であり、現在得られたデータを統計的に処理して納得のいく定義を作る必要がある。

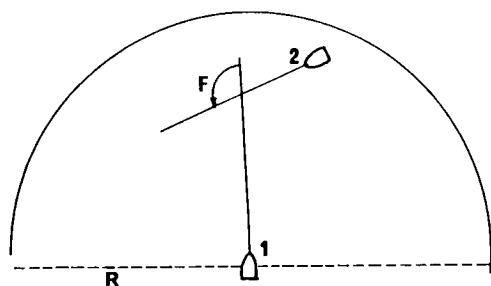


図-2.29 出合い関係の説明図

4) 2船間の接近距離分布

複数船の同航を認める航路や一方交通の航路等の航路幅を決める場合には、お互いの船舶が安全上どこまで接近可能かを、あらかじめ推定できたらば、非常に計画がたてやすいし、その後の不都合もある程度予測できる。

また、航路航行船舶のシミュレーションにより計画の妥当性を確かめたい場合にもシミュレーションに必要な

入力情報として、2船間の接近距離分布を必要としよう。さらに、シミュレーション結果を得たとき、そのシミュレーションが現実をシミュレートしているかといった判定の簡便法として、シミュレーション実施中に、船舶同志の接近距離分布を求めておいて、それを現実の場合と比較することによって、数字でいう必要条件ではあるが、シミュレーションのチェックができる。

ここでは、船舶の航行実態観測調査によって得られたデータから2船間の接近距離分布を求めて、図-2.30、図-2.31、図-2.32に示す。このデータは、2.3.33)と同じく観音崎レーダによる浦賀水道の実態調査のうち、先に述べた時間内に得られた全船舶についてだけまとめたものであり、行会い、同航、横切りの定義は前述したとおりである。したがって、2,000 m以上はなくなる。

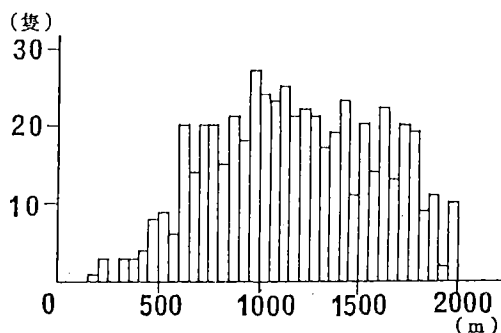


図-2.30 行会い船の最接近距離分布

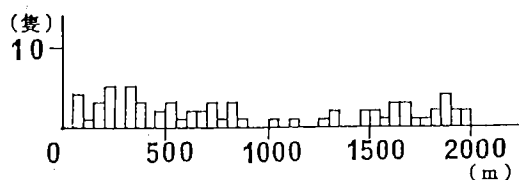


図-2.31 同航船の最接近距離分布

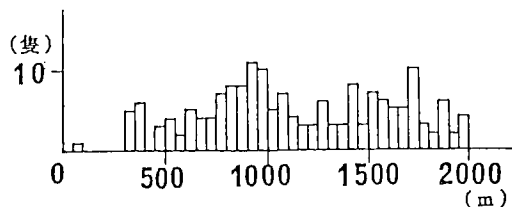


図-2.32 横切り船の最接近距離分布

5) 船の流れ

海上交通の実態を、最も単純にしかも容易に把握する方法は、船の流れを再現することである。これは、時間の刻みを適当に小さくして、時々刻々の船の位置を図示し連続した画面を作成することにより可能である。

図-2.33は、個々の船の位置の時系列データが収納されている航跡MTから、昭和50年10月30日午後1時0分に横須賀沖を通航していた船舶の位置、方向、速力を計算機内で求め図化装置上に図示したものである。図中の矢印は、船の進んでいる向きとその速さを、表示している。

典型的な解析項目である航跡図、密度図、隻数分布図、速力分布図および2)のウィンドローズ表示等は、船の航行による累積の結果であった。これらに対し、船の流れの画面はその瞬間の船の動きを示している。したがって、連続して次々に画面を作成して全体的に見るならば湾内交通流の管制といった問題に対して、また観測や解析によるデータの誤差を度外視して局所的に見るならば、船種・船型等特別に指定された船同志の行会いや、避航の実態に対して直接視覚に訴えた情報をわれわれに与えてくれる。

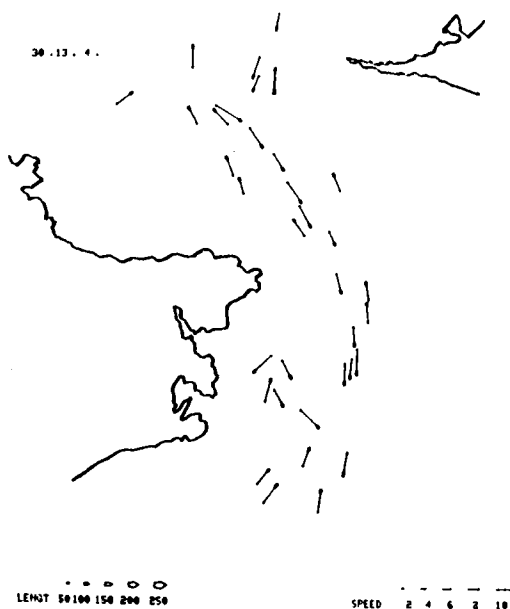


図-2.33 船の流れ

6) 危険度の考え方の検証

商船大学の小林助教授により案出された2船間の危険度 CJ (Collision Judgement) の概念は、商船大学の

操船シミュレータを経験を積んだ航海士に運転させ、つぎの仮設から導かれる結果と照合してみつけた量である。²⁰⁾

- i) 2船間の距離 R が近ければ近いほど、危険量は増大する。
- ii) 接近速度 R が負のとき危険量は増加し、0または正のとき危険量は増加しない。
- iii) 自船の進行方向から相手船への方角 χ は、小さいもの、すなわち船首方位にあるものほど避航の効果が出やすいので、危険量は減少する。
- iv) 方位の変化率 $\dot{\chi}$ に関しては、大きなものほど危険度は減少する。

以上より、

$$CJ = CJ_1 + CJ_2 + CJ_3$$

ここで、

$$CJ_1 = -\dot{R}/R$$

$$CJ_2 = a \chi$$

$$CJ_3 = -b \cdot |\dot{\chi}| \cdot R$$

変形して、

$$CJ(t) = a \cdot \chi(t) - b \cdot |\dot{\chi}(t)| \cdot R(t) - \dot{R}(t)/R(t)$$

を得、 a , b は $a = 1.5 \times 10^{-4} (\text{sec}^{-1})$, $b = 3.75 \times 10^{-5} (\text{m}^{-1})$ とするとシミュレータ結果と一致することを見つけた。

この値を基に CJ を求めることを試みる。

具体的には、来島海峡西部の観測データから、昭和50年7月29日13時30分からのものを用い(図-2.34, 図-2.35), データは1分ごとであるので曲線近似で補間して10秒ごとのデータを作り、上式の微分方程式を差分方程式にして CJ を各相手船に求めると図-2.36となる。

図-2.36をみると、当然のことながら、交差寸前に非常に高くなっていることが認められる。すなわち、図-2.34で自船は7分後に小型タンカーの航跡と交差するが、図-2.36よりその直前の6分20秒に危険度が最大となり、その後、急速に危険度が減り7分30秒を過ぎると0以下になっている。

この CJ はさらに、孤立ブイや縦列ブイや港内等水域固有の危険量を計り、よりよい水域の計画をたてられるような量に拡張してゆくことが可能である。

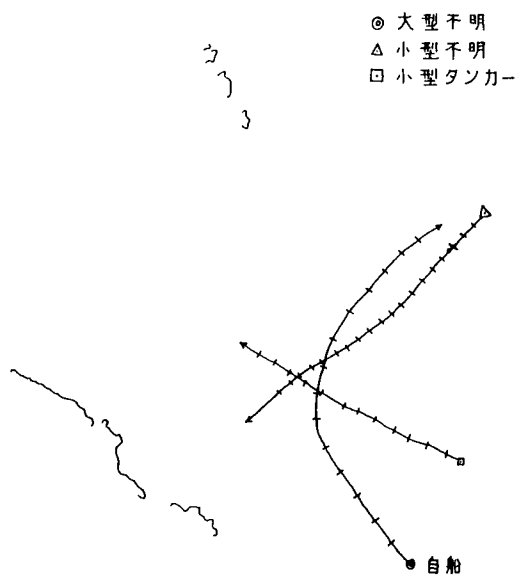


図- 2. 34 自船と他船の相互位置

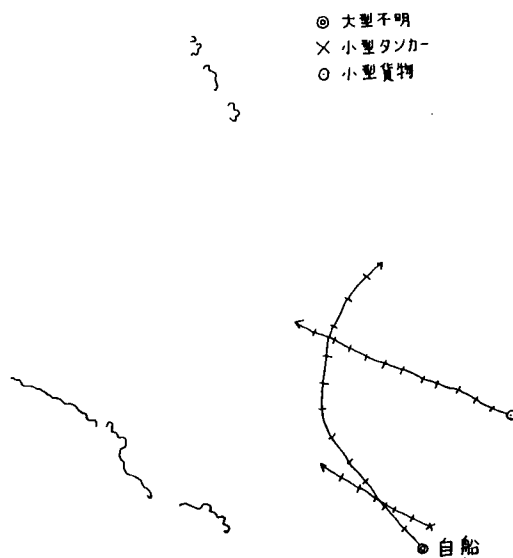


図- 2. 35 自船と他船の相互位置

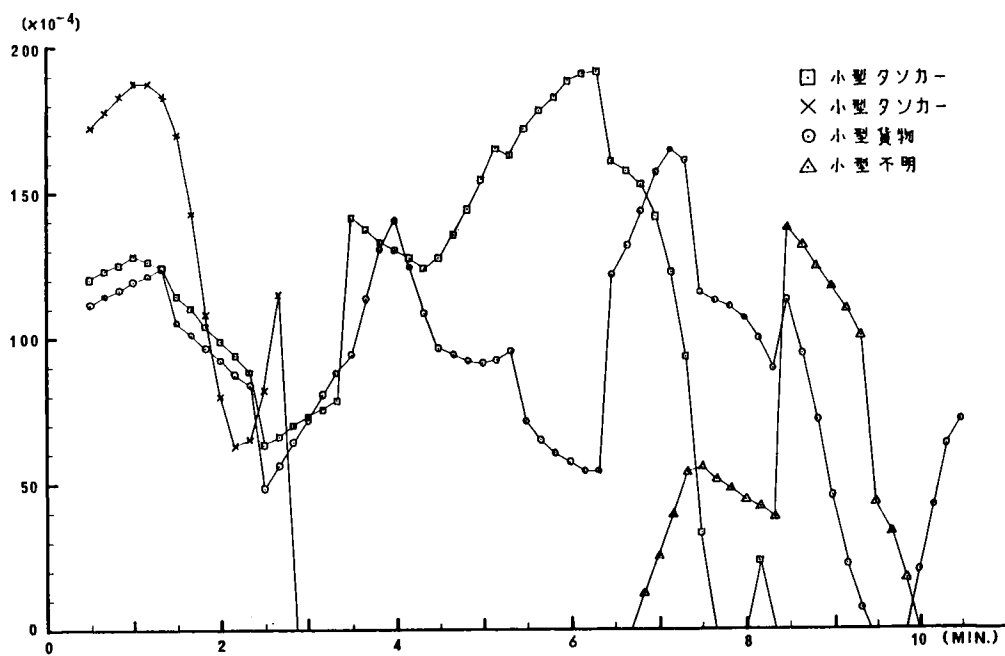


図- 2. 36 2 船間の危険度の推移

7) その他

2.3.3 2) から 6) は既にプログラムも完成しており、利用頻度が高いものは、2.3.2の典型的な解析法へもっていき、解析作業指示表のメニューに加えていくべきであろう。ここで、提案した以外にも、交差点図や交差時間差分布ほか、数多くの解析プログラムが準備されている。

しかし、海上交通流の観測は、常に新しい解析項目が続出し、解析がそれを追いかけることは至極当然のことであろう。したがって、ここに挙げていないから等の理由で、解析をしないということはなく、著者はさらに、海上交通工学上の問題の解明のため次々に新しい解析法を開発していく気がまえてる。

2.3.4 広大な水域における海上交通流の観測と解析 1) 概説

前項までで、海上交通流の実態をマクロ的に観測して解析する手法を確立し、海上交通の実態を把握することが容易となった。本項においては、1箇所の観測地点だけでは対象水域の実態を部分的にしか把握できないような非常に広大な水域における海上交通の実態を把握するための観測手法と観測結果の解析手法として、複数の観

測箇所による方法と移動船舶による方法を示す。

これらの方法によって観測された結果も、究極的に、船種・船型等の識別と時々刻々における船位の絶対座標値が求められさえすれば、前項までに提案した解析プログラムによって、得ようとする情報がただちに求まることから、船位の絶対座標を求めるまでを主眼におく。

なお、解析結果に関しては、従来の静的な図面からダイナミックな航行の実態を損わないように努め、解析結果の一つである「船の流れ」を利用して、動きを有する交通実態そのものを、コム (computer output micro-film) によって直接電子計算機から16 mm 映画とする手法を確立した。その結果、船舶の動きが視覚でとらえられ海上交通の実態が非常に身近になったと同時に、解析作業もフィルムアナライザーを利用してマニュアルで行える領域が増大した。

2) 複数レーダによる観測法と観測データの処理法

(1) 航行実態観測の概要

ここでは、複数のレーダによる観測として、船舶交通の輻輳の著しい広大な水域である東京湾内の航行実態の観測の例を報告する。

東京湾内においては、周知のように、経路が縦横に交

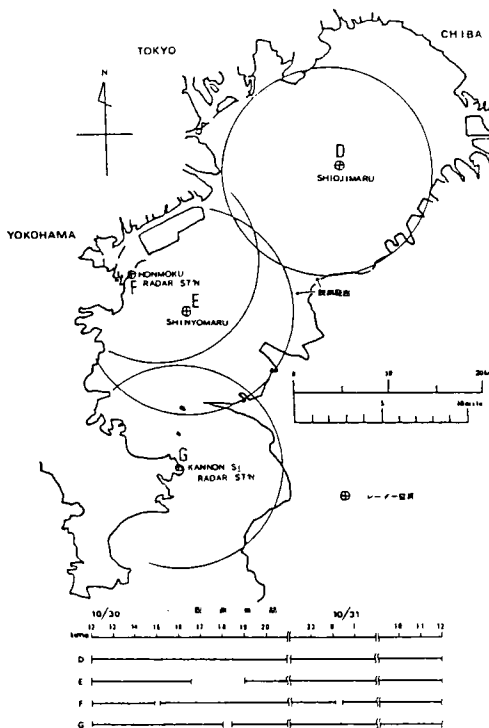


図-2.37 レーダ設置場所

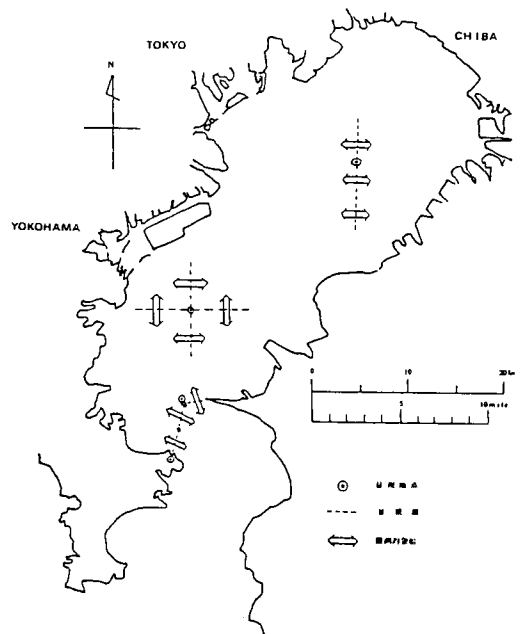


図-2.38 目視観測

差し、しかも航行船の中には原油タンカー、液化ガスタンカー、ガソリンタンカー、カーフェリー等その事故が重大な結果を招く船舶が多数存在している。そのため、東京湾の船舶交通の安全対策樹立のための基礎資料を得る目的で、東京湾全域にわたって複数のレーダーでカバーして東京湾内における船舶航行の実態を同時観測した。これにより、在来の観測・解析法に加えて広域水域における航行実態調査の確立をはかった。

この調査は、図-2.37のようにレーダーを設置し、目視対象海域を図-2.38とし、昭和50年10月30日正午から10月31日正午までの24時間観測を行ったものである。

(2) 観測データの処理

おのおののレーダーによる観測結果、およびそのレーダー画面内地域を対象とする目視観測結果の整理は、1台のレーダーによる解析を抜いた2.3.1 3)で述べたとおりである。したがって、ここでは解析システムにかかる形にするまでを述べる。

東京湾の観測の場合、4台ともプロット時間隔2分で撮影し、船位座標 $x(i)$ 、 $y(i)$ の座標軸は、北緯35°00′、東経139°30′に原点を設定し、東の方向に x 軸を、北の方向に y 軸を正方向にとっている。地球が球であることによる球面補正は、補正値が利用したレーダーの性能の誤差よりも小さいことからしていない。

以上の操作は一地点の観測と全く同一であるが、複数レーダーの場合には、レーダー間をまたがって航行する船舶を同定する（識別と区別する言葉で同一と定めるの意）という航跡のつなぎあわせ作業が必要となる。

航跡のつなぎあわせは、図-2.39のように甲、乙両レーダー画面に重なる領域上に、多くの航跡と可能な限り直角に近い角度で交わる基線 VW を適当に定め、甲レーダー画面上で、その基線を横切る船舶の位置（基線上の一次元の値とした）、その瞬間の時刻、基線を横切る前後各2プロットの時刻と船位、船の情報を保存しておき、乙レーダーでも同一の手順を行って、同一時刻に一定距離内にある船舶を他レーダーによる航跡の中から選り出し、選り出された船舶が一船の場合にはその船を同一船とみなす。同一船の対象となる船舶が2船以上ある場合は、それぞれについて、基線 VW を通過する時間差距離差のベクトル長の小さい方を同一船とする。さらに基線を通過しない船で甲、乙両レーダーにまたがる船舶もあることから、基線 VW を別の場所に設定して上述の手順をくり返す。

実際には、同一船と見なすのが非常に難しいケースが生ずる。そのような場合には同定する作業をも行った。

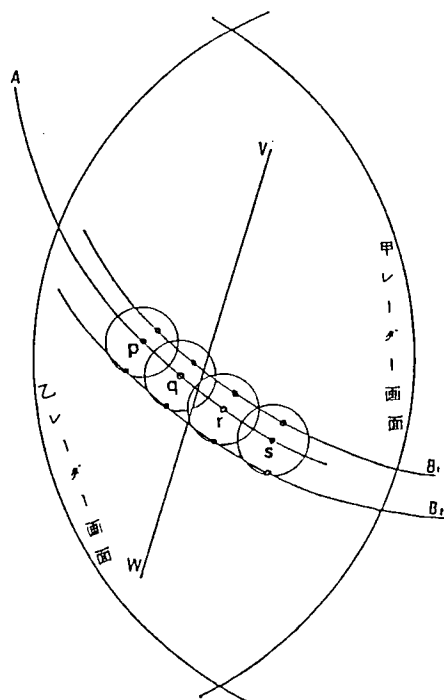


図-2.39 航跡のつなぎあわせ

機械的に同定したものについても、最終的に人手によるチェックを行った。

このようにして、次々にレーダー航跡を同定して、一本の磁気テープに統合した。

(3) 動的な航行実態の表示

このようにして一本にまとめられた磁気テープは、既に関係されている各種の図面や表の作成プログラムで直ちに使用できること、および、このオリジナルデータを各自が利用できることは既に述べたが、それらを用いて出力された結果は、静的なものであり、原データの有するダイナミックな情報は非常に薄められてしまう。章末の文献に、これらの観測の結果である多数の図表が作成されているが、それらをも観測データのもつ動的な情報量は失われている。それらを可能な限り生かす試みとして、東京湾を縦・横・斜めの500 mごとのメッシュで切り、それを通過した船舶の速力とその標準偏差を記したのが、図-2.40～図-2.42である。

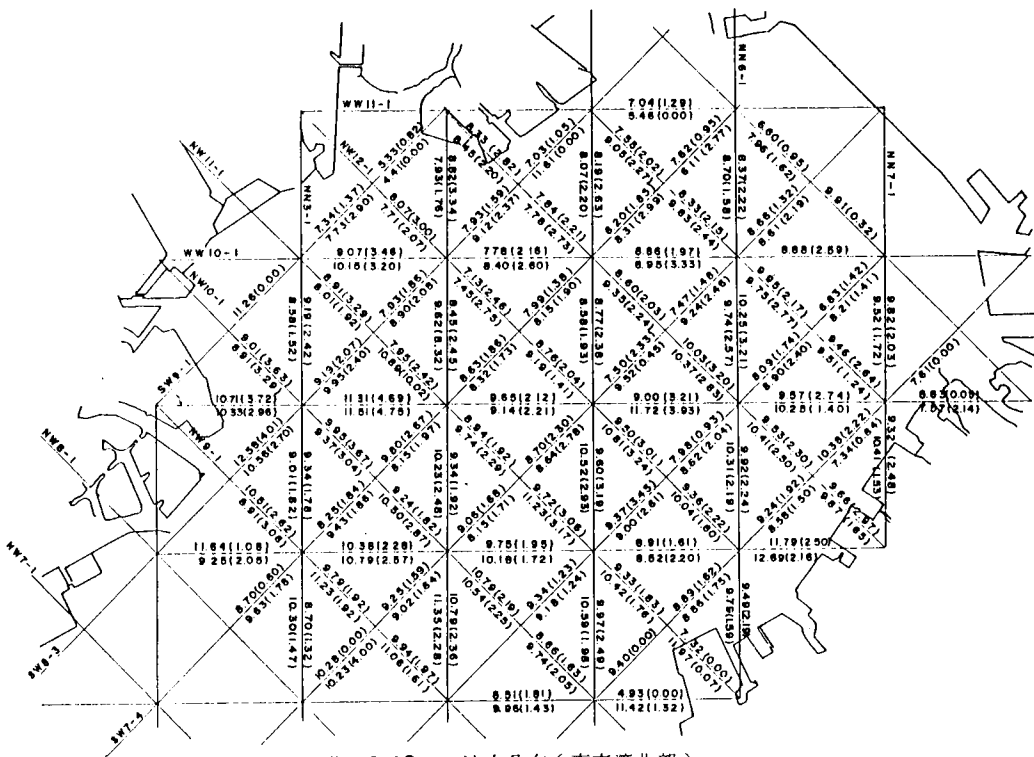


図-2.40 速力分布(東京湾北部)

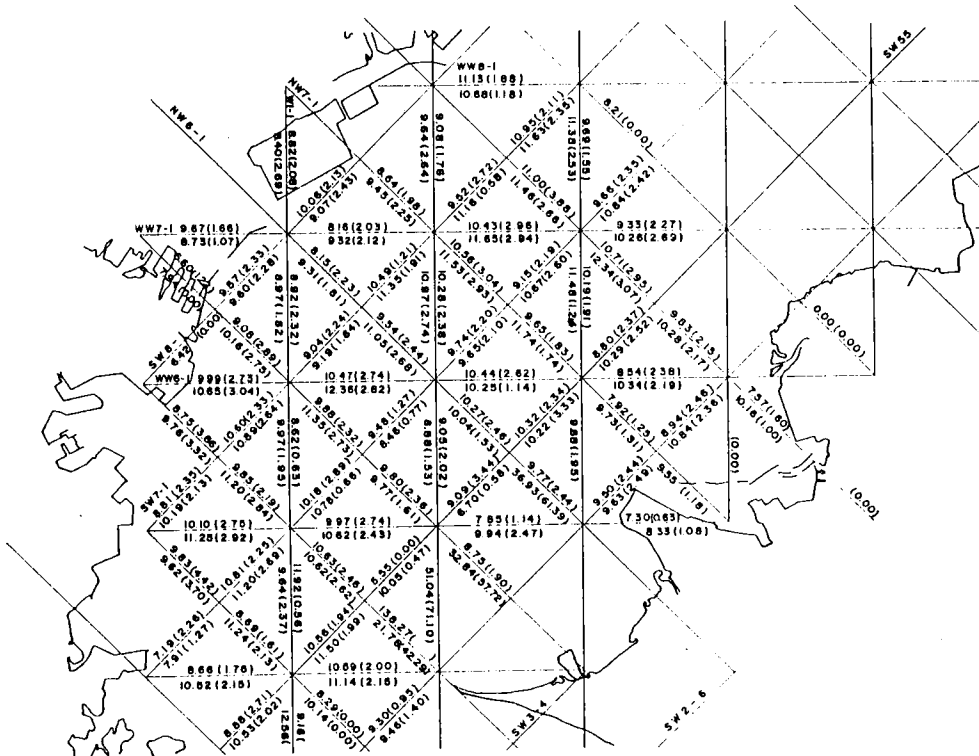


図-2.41 速力分布(横浜～木更津間)

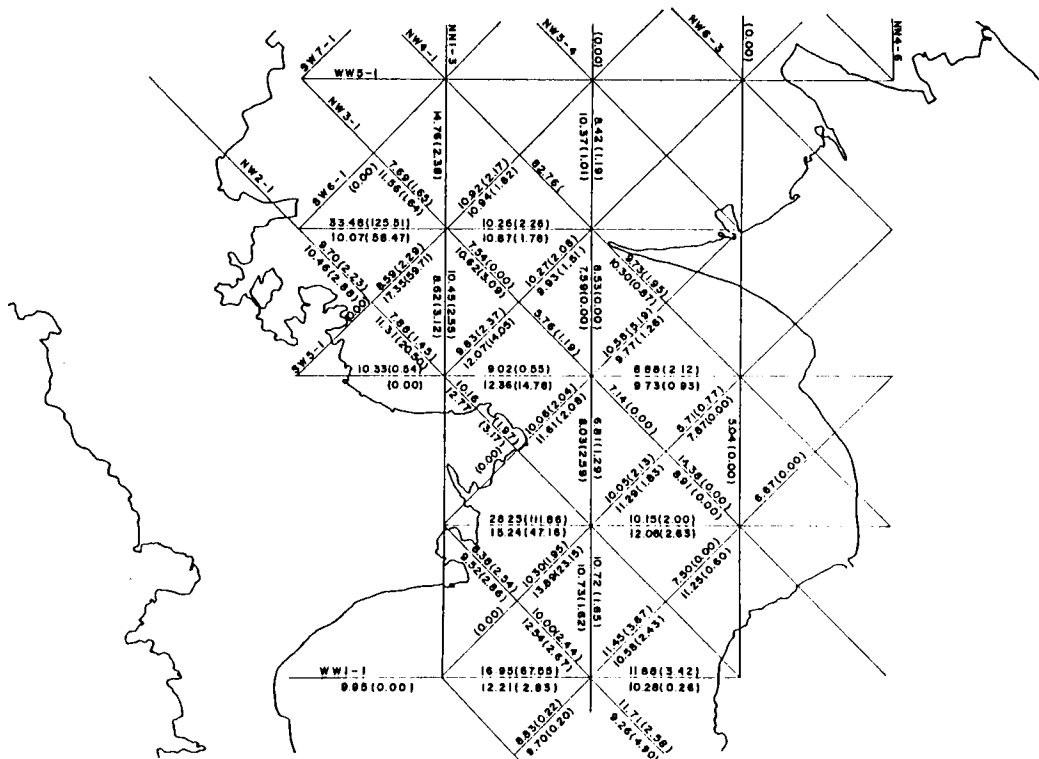


図-2.42 速力分布（浦賀水道）

さらに、航跡を30分ごとに区切って図表示したものが図-2.43～図-2.49であり、時間的経過がとらえられている。

ここで、30分ごとの航跡を、さらに短い時間にするによりダイナミックな情報が得られるが図面枚数が莫大になることから、観測実態そのものの映画化を試みた。ダイナミックな動きを見るには、レーダ画像そのものをコマおとして映写する方法もすでに行われているが、レ

ーダ映写は非常に見づらいこと、およびこの場合のように複数台のレーダによる観測では別々に映写しなければならないことを考えると、複数台のレーダによる観測結果をそのまま映画にすることは、相互間の関係が同時に見られるので非常に意義深いといえよう。

具体的な手法は、解析の項で述べた「船の流れ」図面を作成するプログラムを利用する。これは、指定された時刻に観測対象海域に存在する全船舶を、その時刻に存



図-2.43 航跡図（10/30，1200～1230）



図-2.44 航跡図（10/30，1230～1300）

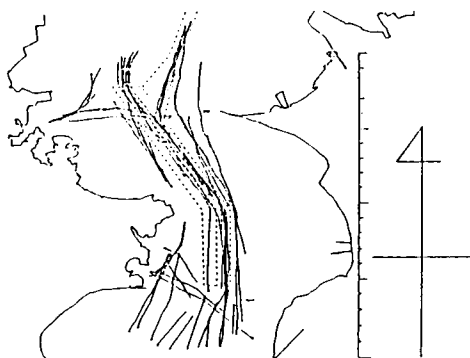


図-2.45 航跡図(10/30, 1300 ~ 1330)

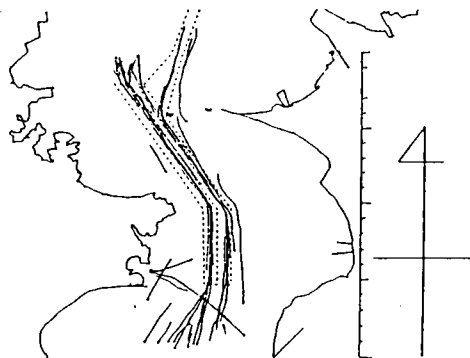


図-2.48 航跡図(10/30, 1430 ~ 1500)



図-2.46 航跡図(10/30, 1330 ~ 1400)

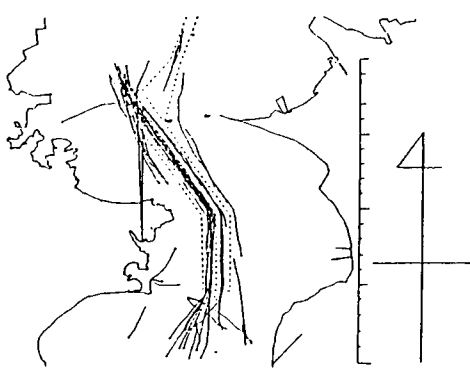


図-2.49 航跡図(10/30, 1500 ~ 1530)

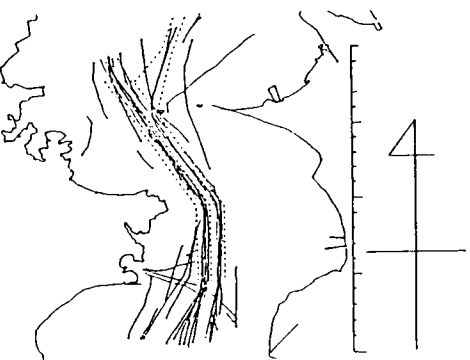


図-2.47 航跡図(10/30, 1400 ~ 1430)

在する位置に、進行方向が船首方向で船の大きさを考慮した船の形に描き、さらに、速力と進行方向を示すベクトルが船首から突き出し、地形等その他の必要情報までもを描くプログラムである。

実際の映画化にあたっては、ベクトルの長さを決める比例定数を0とすることにより船首から突き出している速度ベクトルを消し、時刻指定を連続的に変化させて、映画の原画を次々に得る。

映画化にとってさらに都合のよいことは、解析システムにおける一連の図化作業は「簡易図化プログラミング」⁶⁾によってなされているので、COM(Computer Output Microfilm)を利用して、16mm映画が計算機から直接に何らの図面も介在されずに作成される。このフィルムに、前後のタイトルを付加すると、映画として完成し、すべての映画化作業が電子計算機で行われる。

写真-2.1から写真-2.8が前のタイトルであり、写真-2.9は実態調査の映画化の部分であり、写真-2.10は後のタイトルである。このうち、写真-2.5のレーダのPPI画像のみは、簡易図化プログラミングでなく別に焼付けを行っている。また後のタイトルの写真-2.10はENDの字にズームの手法を取り入れて、一点から徐々に拡大していくようなくふうがなされている。

観測の映画化の部分ではここでは31日12時35分(写真-2.9)にとどめるが、映画によって、昼は港内流動船が、夕方は出港船が、朝方は入港船が多くなることがわかる。

この映画は、在来の解析システムによって純化された海上交通の特性を補完するものとして、海上交通の計画



写真-2.9 映画の1コマ(10/30, 12:35)

に利用されることが期待される。

なお、映画作成にあたっては、オリジナルデータの2分間隔では画面の動きが粗くなることから、より滑らかにするために、1分間隔の位置を直線補間より求めて、同一画面を12コマずつ焼きつけた。1分以下も補間してより滑らかな動きにすることも可能であるが、計算時間の増大とCOMの画像フィルム製作費の増大を招くことから今回は1分までにとどめた。上映時間は24時間分すなわち1,440分×12コマを1秒24コマ送りで映写するとして、前後のタイトルの映写時間を含め、12分強である。

3) 移動船舶による観測法と観測データの処理法

(1) 観測概要

広域な東京湾を複数のレーダで観測する手法を2)で述べたが、さらに広域な日本沿岸全域における海上交通実態を把握する際には、陸上レーダからでは対象海域が遠すぎる場合があること、停泊船のレーダからでは海の水深が大きいため投錨不可能となること等の理由により、航行中の船舶によるレーダ観測法が考えられる。もちろん本船が移動することから固定点からの観測と異なり、同航船の航跡は長く反航船の航跡は短くなるが、その欠点を補っても、なお、日本列島沿岸における船舶交通量のマクロ情報を与えてくれよう。

観測の方法は、陸上あるいは停泊船における観測と同様にa分ごとにb秒間の露光をし、c枚重ね撮りする自動撮影装置を用いるが、船の移動は常に同方向と限らず振れることもあることからc=1とするのがよい。

一方自船は移動しているので、時々刻々と移動する自船の位置を求めておかねばならない。

(2) 観測データの処理法

ノースアップレーダによる撮影フィルムの時刻tの画像上で、自船の位置を原点にとり、x軸の正方向を東の方角へ、y軸の正方向を北の方角へとり、画像上に写って



写真-2.10 終りのタイトル

いる他船の座標を (x_i, y_i) とする。これは、フィルムアナライザで容易に読みとり可能である。

また、自船の航行水域上でもx軸の正方向を東の方角に、y軸の正方向を北の方角にとった絶対座標系を設けて、時刻tにおける自船の位置の絶対座標を (X_t, Y_t) とすると、時刻tのレーダフィルム上で相対座標 (x_t, y_t) の位置にある他船の時刻tにおける絶対座標 (X'_t, Y'_t) は、

$$X'_t = X_t + x_t$$

$$Y'_t = Y_t + y_t$$

で表される。

したがって、時刻tのフィルムから他船の相対座標 x_t, y_t を読みとり、他船を固定してtを次々にかえていくと $\{x_t, y_t\}$ の二次元数列が得られ、一方、時刻tの自船の位置を表す二次元数列を $\{X_t, Y_t\}$ とすると、他船の時刻tの絶対座標は $\{X_t + x_t, Y_t + y_t\}$ の二次元数列で得られる。

この値を2.3.1 3)で述べた形で磁気テープに保存すると在来と同一タイプの磁気テープが得られ、解析プログラムにかけることのできるデータテープとなる。

(3) 適用例

以上述べてきた航行中の船舶による船舶航行実態観測の例として、運輸省航海訓練所の練習船銀河丸が室戸岬沖から潮岬沖を航行した際に観測したレーダフィルムをもとにして絶対航跡を求めると図-2.50となる。ここで、円はレーダのレンジを図示したもので、やや大きくて長い航跡は銀河丸の航跡である。また、航路の平滑化は行っておらず、上で計算した (X_t, Y_t) を次々に結んだ。

この場合の撮影およびレーダセットの条件は、

レーダレンジ 12海里

3分間に1回露出、1枚撮り、連続撮影

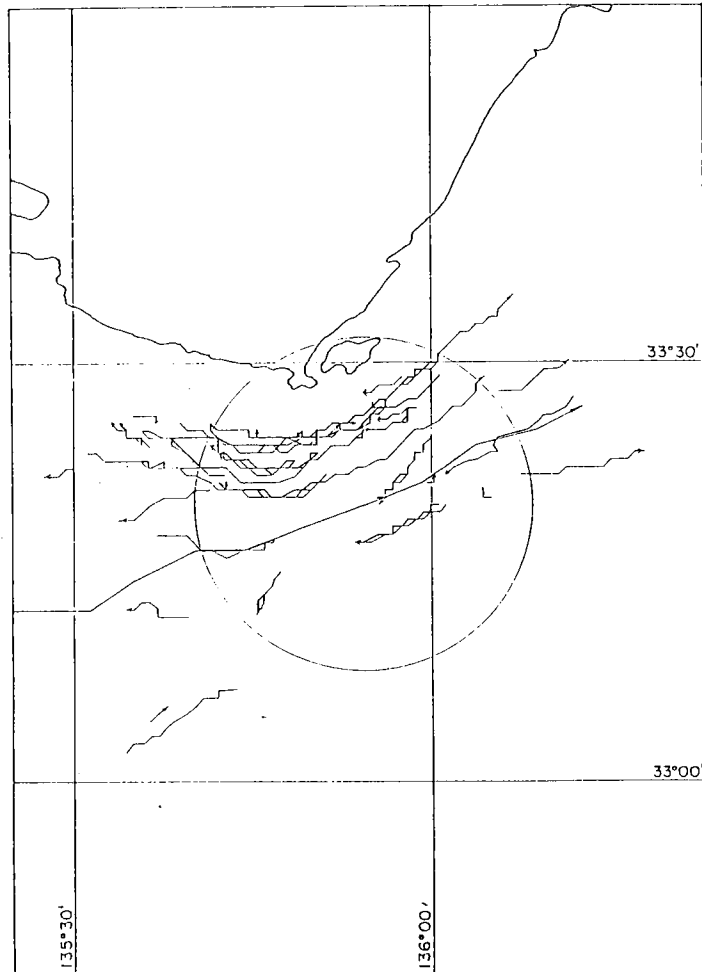


図-2.50 移動船舶による観測結果（潮岬沖）

船首輝線セット（ノースアップレーダであるので船首方向がわかるように船首方向に輝線をセット）

である。

これらの図によってわかるように、この程度の精度でも海上交通量のマクロ予測は可能となる。したがって、種々の海上交通計画に有益であることが予想され（避難港計画における潜在収容避難船隻数の予測等）、日本列島沿岸において、この種の統一的な観測が行われることは有意義である。実際上は、12海里レンジのレーダで観測船2船を併航させることにより沿岸の海上交通量がほとんど得られる。

航跡の平滑化については、図が3分ごとの船位を結ん

でいることからジグザクとなっているが、撮影時間隔の短縮、船位測定の上向化、船首輝線の利用、船舶航跡そのものの平滑化等の導入によって、よりスムーズな航跡が得られることが予想される。

2.4 結言

海上交通流の観測は、その重要性により、従来からも活発に実施されている。しかし、従来では観測結果の解析はすべて人手によって行われ、航跡図、速力分布図、ゲートライン通過隻数図に留まり、密度分布図は求めることが難しく、辛うじて、与えられたメッシュ内に存在する船舶の画面数を数えることによって求める場合があった程度である。

それらの解析も、船種・船型別、方向別、時間帯別、

ODゾーン別となると人の手だけでは労力が非常にかかり、また、作業の正確さの点からも誤りが入りやすくなるといった欠陥があげられる。

さらに、海上交通流の観測の実施は困難であるが、観測結果には大量の貴重な情報が含まれており、上記の解析のみで終わらせてしまうには、余りにも惜しまれることである。したがって、数多くの情報量によるその他の解析はともかくとしても、すべての情報を何時でも誰もが利用できる形で保存しておくことを目的として、観測結果の電子計算機による処置を思いついたのである。これは観測で得られた全情報を磁気テープに保存することから始まり、次いでその磁気テープを基にして多種類の解析プログラムを作成し、観測法とあわせて解析システムを開発するに至った。

その後、数多くの海上交通流の観測はこのシステムを用いて実施されており、海上交通計画に必要な計画情報を計画担当者に与えてきた。

本章は、以上に述べた海上交通流の観測および解析システムについて取りまとめた結果であるが、主要な成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 陸上の交通工学と比較すると著しく立ち遅れている海上交通の分野において、従来の方法に比べて著しく省力化を図るとともに、正確にして迅速な観測法と観測データの処理法を開発した。
- (2) 水域計画の計画担当者に海上交通流の実態に関する大量の情報をあたえることを可能とした。
- (3) 広大な水域における船舶交通流の観測として、複数レーダによる同時観測と移動船舶による観測による観測法を確立した。
- (4) 解析結果の表示は交通特性を純化してわかりやすく整理してはいるものの、動的な情報がほとんど消失してしまうことから、それらを損わないように実態観測結果の16mm映画化を試み、動的情報をそのまま再現することに成功した。
- (5) 海上交通工学の理論については、いまだ陸上交通工学に遠くおよばないが、この様な形で集積されたデータは海上交通工学の理論の樹立および検証に必要欠くべからざるものとなろう。

参 考 文 献

- 1) 奥山育英, 早藤能伸, 佐々木芳寛, 中辻 隆: 海上航行船舶挙動に関する研究(第1報) — 観測法と解析法の確立 —, 港湾技術研究所報告, 第15巻, 第1号, 1976年, pp. 33~48.
- 2) 奥山育英, 早藤能伸, 佐々木芳寛, 中辻 隆, 吉

田行秀: 海上航行船舶挙動に関する研究(第2報) — 実態調査手法の確立 —, 港湾技術研究所報告, 第16巻, 第1号, 1977年, pp. 29~50.

- 3) 奥山育英, 早藤能伸, 中辻 隆, 吉田行秀: 海上航行船舶挙動に関する研究(第3報) — 広域水域における実態調査手法 —, 港湾技術研究所報告, 第17巻, 第1号, 1978年, pp. 119~133.
- 4) 狭水道, 沿岸における船舶交通の実態調査, 日本海難防止協会, 年刊.
- 5) 通航船舶実態調査報告書, 海上保安庁, 年刊.
- 6) 奥山育英, 早藤能伸, 吉田行秀: 簡易凶化プログラミングシステムの開発, 港湾技研資料No. 259, 1976年.
- 7) A. クパール著, 藤井弥平訳: カレー海峡(ドーバー海峡)における海上交通の監視と規制, 運輸研究所報告, No. 15, 1976年.
- 8) 東京湾船舶航行実態調査報告書, 運輸省第二港湾建設局, 1976年.
- 9) 伊勢湾湾口部船舶航行実態調査, 運輸省第五港湾建設局, 1976年.
- 10) 奥山育英, 早藤能伸, 中辻 隆, 佐々木芳寛, 吉田行秀: 水域計画手法に関する研究, 昭和51年度, 港湾技術研究所講演会講演集, 1976年, pp. 143~169.
- 11) 神戸港沖通航船舶実態調査報告書, 運輸省第三港湾建設局, 1971年.
- 12) 東京国際空港沖合船舶航行解析調査報告書, 運輸省第二港湾建設局, 1978年.
- 13) 新高松空港整備計画に係る船舶航行実態調査報告書, 日本海難防止協会, 1979年.
- 14) 東京国際空港沖合展開に伴う船舶航行影響調査報告書, 運輸省第二港湾建設局, 1980年.
- 15) 大阪湾岸道路関連神戸港港湾施設計画調査報告書, 運輸省港湾局, 1980年.
- 16) 大阪湾船舶航行実態調査報告書, 運輸省第三港湾建設局, 1980年.
- 17) 海上交通影響調査報告書, 運輸省第三港湾建設局, 関西国際空港調査室, 1980年.
- 18) 伊勢湾航路体系調査報告書, 運輸省第五港湾建設局, 1981年.
- 19) 避難港配置計画調査報告書, 運輸省第一港湾建設局, 日本ビジネスオートメーション株式会社, 1982年.
- 20) 小林弘明: 船舶避航操縦運動の解析 — 人間・機械系解析の観点より —, 日本航海学会論文集, 第

56号，1976年，pp.101～109.

- 21) 藤井弥平，卷島 勉，原 潔：海上交通工学，海
文堂，1981年，pp.79～80.

3. 船舶の主要寸法に関する解析

3.1 緒言

海上交通計画の主要な課題である交通流の検討には、閉塞領域の概念が頻繁に利用されるが、閉塞領域は船舶の全長に依存した値で表されることから、船舶の全長は海上交通計画に、非常に重要な量である。

また、港湾の施設計画において船舶の形状・寸法が影響を及ぼすものとして、水域施設およびふ頭施設があげられる。水域施設においては航路の幅・水深・湾曲度・延長・最小直線長等に影響し、泊地においては面積・水深に影響する。ふ頭施設においては構造物の設計に直接影響するバースの諸元に関係する。

したがって、これらの計画を合理的に、かつ、安全性をも考慮して行うためには、種々の条件を勘案した総合的検討の必要性はいうまでもないことであるが、そのうちでも船舶の寸法はそれらに影響する度合いが非常に大きいといえよう。専用バースであれば対象設計船が固定されるため、問題は少ないが、公共バースの場合は不特定多数の船舶が対象となるので代表的船型を決め難く、そのためにも数多くの船舶寸法データを解析し、適切な船舶形状寸法間関係を明らかにしておく必要がある。

従来にも船舶の寸法相互関係についての解析¹⁾はなされているが、日本船のみを対象として、4船種、約900隻と船種およびデータ数の少なかったこと、およびトン数測度に関する条約の規定、船舶の巨大化・高速化および造船技術の向上等の諸事情の変革によって船体構造も変化して、係留施設において水深不足とか延長不足などの問題も生じており、それらの問題に対応すべく船舶寸法の見直しの必要性から、本章では日本船舶明細書¹³⁾とLloyd's Register of Ships¹⁴⁾に記載されているデータのうち、船舶の耐用年数を考慮して船齢30年以下のものを抽出し、外国船も含めた解析を行った。

マスト高は、海上横断工作物の高さを決定する際に必要不可欠であるが、最近のように海上橋が建設される場合が多くなるにつれて特にその必要性が増してきた。しかし、マスト高は上記資料からは得られないことから、別途調査により、極力多くのデータを収集し、利用しやすい解析結果を提示することに努め、従来のマスト高の資料に見られる利用上の不便さを解消するように努めた。

3.2 船種分類

船舶の主要寸法を解析するに際して、日本船舶明細書とLloyd's Register とでは船種の分類方法が異なっているので、日本船舶明細書による分類法を基本として船種の分類を行った。この分類法は用途別に船種を50船種

に分類しており、したがって以下に述べる類似船種の統合を論ずるためには、船体構造よりもむしろ積荷形態および荷役形態を重視した用途別分類法に従うのが最も妥当であると考えられる。

港湾構造物設計基準³⁾において船舶の種類は、一般貨物船、鉱石専用船、石油タンカー、旅客船、カーフェリー（単胴船）等に分類されており、港湾計画においてもこの程度の分類が用いられるため、前述の分類を大分類とし、それを基本として以下に示す統合分類を行った。細分類としては日本船舶明細書の50分類が該当する。（一般貨物船）

貨物船は経済性を優先することから、居住設備（Accommodation）等は可能な限り簡素化し、船倉（Hold）を広くとり、荷役設備（Cargo gear）に重点をおいている。用途上からは公共岸壁を利用し、雑貨、撤荷等を扱うもので、特殊船として分類されない船舶である。

細分類としては貨物船を基本とし、荷役、積荷形態、利用形態、船体構造等で同等とみなせる船種を同一グループとして一般貨物船の種類に含めた。貨物船、撤積専用船、重量物貨物兼用船、自動車撤積兼用船、穀物専用船、セメント専用船、塩専用船、鋼材専用船が、該当する。

ここで、自動車撤積兼用船は貨物船と船体構造が類似していること、および船型の分布形が撤積専用船の分布形と類似していることから、利用形態等も考慮して貨物船の分類に含めた。

また、セメント専用船の荷役形態および外観は一般貨物船と異なるが、実情では公共岸壁に接岸する場合が大部分であり、船体構造も貨物船と類似していることから貨物船の分類に含めた。

（鉱石貨物船）

鉱石類の運搬船で、その荷役は沖荷役が不可能なことから、特殊な接岸設備が必要となる船舶で、専用岸壁を用いるものが多い。したがって細分類としては鉱石専用船を基本とし、荷役形態、船体構造、利用形態等で同等とみなせる船種を同分類とした。

細分類では、鉱石専用船、石炭専用船、ニッケル専用船、ボーキサイト専用船、燐鉱石専用船が、該当する。

（石油タンカー）

原油を船倉に直接に積み込んで、撤積輸送する船舶を指すが、糖蜜、硫酸、クレオソートなども同様に輸送される。それらは特殊な構造となっているが、全体的に判断すれば油槽船に類するものである。

細分類としては、油槽船を基本とし荷役形態、船体構造、利用形態等で同等とみなせる船種を同分類とし、油槽船、鉱石油兼用船、ケミカルタンカーが該当する。

ここで、鉱石油兼用船は、船体構造がほぼ油槽船と同等視でき、鉱石船も比較的大きく、利用形態等からも石油タンカーの分類に含めた。

（旅客船）

純客船以外に貨客船も含む。日本船舶明細書の分類では客船であっても、法規上では旅客定員が13人以上であれば客船として取り扱われるため、船によっては実質上は貨物船的扱われ方をしている場合も多い。

（カーフェリー）

自動車航送船で主に近海航行船である。ここでは単胴式自動車航送船のみを対象とする。

（木材専用船）

木材専用船は、貨物船と比較して平均吃水が小さめであり、用途上からも荷役形態からも一般貨物船と種類を異にすることから、独自の分類とする。

（フルコンテナ船）

船舶の艀口が広く、かつ艀内は直方体となり、コンテナ積み専用に建造された船舶である。

3.3 解析対象船舶

日本の港湾施設に関与する船舶を対象にするという前提にたってデータのサンプリングを行った。一般に外航船は3,000 GT以上の場合が圧倒的に多い（8割以上）ため外国籍の船舶については3,000 GT（旅客船については5,000 GT）以上の船舶を対象にし、それ以下の船型については日本籍の船舶のみを対象とした。したがって日本船は全船型にわたって抽出している。ただし、カーフェリーについてはすべて日本船のデータである。

マスト高に関しては、設計図面より求めなければならぬので、可能な限り設計図面を収集して、解析に利用した。

各船種の計算対象のトン階幅は公共性の強い範囲を考え、以下のように定めた。

〔マスト高調査以外の場合〕

一般貨物船	………	500 DW～ 60,000 DW
石油タンカー	………	500 DW～ 150,000 DW
鉱石専用船	………	500 DW～ 100,000 DW
木材貨物船	………	500 DW～ 30,000 DW
旅客船	………	300 GT～ 70,000 GT
カーフェリー	………	300 GT～ 12,000 GT

〔マスト高調査の場合〕

一般貨物船	………	300 GT～ 70,000 GT
石油タンカー	………	300 GT～ 130,000 GT
フルコンテナ船	………	4,000 GT～ 60,000 GT
旅客船	………	300 GT～ 30,000 GT
カーフェリー	………	300 GT～ 15,000 GT

トン階の下限値を500 DWまたは300 GTに設定した理由は、下限値以下の船舶は利用対象ベースが物揚場以下に該当することから対象外にしたことによる。また寸法の解析では、カーフェリーのみ日本船を扱っているのでもトン階幅を分けることはしていない。

また、マスト高調査のうち旅客船の船型上限値を30,000 GTとした理由は、30,000 GT以上の大型旅客船は建造隻数および美観性などから一般的な傾向が定め難いため、特殊ケースと考え、対象外としたことによる。

さらに船の建造年月日が1949年以前の船舶については、以下の理由によりデータとして採用しなかった。

- (1) 建造年月が1949年以前の船舶は、船齢が30年以上でほぼ耐用年数に達しており、かつ船種別船齢別隻数を調べると表-3.1～表-3.6となり、1949年以前の船舶数は10%以下である。したがって現時点における船舶形状寸法と同等視することは不適当である。

表-3.1 一般貨物船

DW 建造年	0~5 千トン	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	40~45	45~50	50~55
1949年以前	12	317	297	65	7	21	10	6	0	0	1
1950~1954	8	287	155	42	30	14	3	0	0	0	0
1955~1959	190	392	548	161	33	11	3	1	2	1	0
1960~1964	916	343	258	167	109	94	37	17	11	12	7
1965~1969	1,236	526	250	301	137	173	40	96	65	47	41
1970年以降	673	556	219	298	136	228	135	50	22	10	34
計	3,035	2,421	1,727	1,034	452	541	228	170	100	70	83

DW 建造年	55~60	60~65	65~70	70~75	75~80	80~85	85~90	90~95	95~100	100~105	105~110
1949年以前	1	0	4	3	1	0	0	0	0	0	0
1950~1954	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1955~1959	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1960~1964	3	3	0	0	1	0	0	0	0	1	0
1965~1969	38	13	11	9	16	6	3	0	0	0	3
1970年以降	15	30	21	1	6	4	1	2	0	5	5
計	58	46	36	13	24	10	4	2	0	6	8

DW 建造年	110~115	115~120	120~125	125~130	130~135	135~140	140~145	145~150	150~	計	百分率
1949年以前	0	1	0	0	0	0	0	0	0	746	7.4
1950~1954	0	0	0	0	0	0	0	0	0	539	5.3
1955~1959	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1,344	13.3
1960~1964	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,980	19.5
1965~1969	0	1	0	0	0	0	0	0	1	3,013	29.8
1970年以降	8	12	8	5	0	4	0	2	6	2,496	24.7
計	8	15	8	5	0	4	0	2	8	10,118隻	100.0%

表-3.2 石油タンカー

DW 建造年	0~5 千トン	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	40~45	45~50	50~55
1949年以前	6	39	24	50	8	26	8	1	0	3	0
1950~1954	9	15	46	174	56	55	47	8	11	5	2
1955~1959	79	20	59	183	175	69	118	103	61	44	29
1960~1964	511	22	16	51	84	47	47	62	41	50	112
1965~1969	776	88	26	39	78	27	4	18	0	13	30
1970年以降	641	119	27	30	41	36	48	20	1	2	4
計	2,022	303	198	527	442	260	272	212	114	117	177

DW 建造年	55~60	60~65	65~70	70~75	75~80	80~85	85~90	90~95	95~100	100~105	105~110
1949年以前	0	1	1	1	1	1	2	0	0	0	0
1950~1954	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
1955~1959	4	2	1	4	1	1	3	4	0	0	1
1960~1964	51	41	15	20	13	9	8	8	14	5	1
1965~1969	12	35	31	57	62	24	54	17	40	31	14
1970年以降	1	3	2	8	7	8	6	0	13	5	3
計	68	82	50	90	84	43	74	29	67	41	19

DW	110～115	115～120	120～125	125～130	130～135	135～140	140～145	145～150	150～	計	百分率
建造年											
1949年以前	1	2	0	0	0	1	0	0	18	194	3.3%
1950～1954	0	0	0	0	0	0	0	0	0	429	7.3
1955～1959	0	0	1	1	0	0	0	0	0	963	16.4
1960～1964	0	2	1	0	1	1	0	0	2	1,235	21.0
1965～1969	12	6	17	4	4	4	2	1	97	1,623	27.6
1970年以降	9	6	2	4	8	25	7	1	343	1,430	24.4
計	22	16	21	9	13	31	9	2	460	5,874隻	100.0%

表-3.3 鉱石専用船

DW	0～5	5～10	10～15	15～20	20～25	25～30	30～35	35～40	40～45	45～50	50～55
建造年											
1949年以前	0	1	1	0	3	0	0	0	0	1	0
1950～1954	0	5	2	3	0	0	0	0	0	0	0
1955～1959	0	19	7	43	5	2	4	10	0	2	4
1960～1964	12	16	8	26	17	12	3	6	0	1	10
1965～1969	13	3	3	6	5	6	1	2	0	0	2
1970～	1	4	1	0	3	5	2	0	0	1	0
計	26	48	22	78	33	25	10	18	0	5	16

DW	55～60	60～65	65～70	70～75	75～80	80～85	85～90	90～95	95～100	100～105	105～110
建造年											
1949年以前	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1950～1954	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0
1955～1959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1960～1964	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1965～1969	15	2	4	3	5	0	2	0	1	2	2
1970～	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	1
計	17	3	4	7	5	1	4	0	1	2	3

DW	110～115	115～120	120～125	125～130	130～135	135～140	140～145	145～150	150～	計	百分率
建造年											
1949年以前	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	2.0%
1950～1954	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	3.8
1955～1959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	96	27.7
1960～1964	0	0	0	0	0	0	0	0	0	113	32.6
1965～1969	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77	22.3
1970～	1	3	2	1	1	0	0	1	9	40	11.6
計	1	3	2	1	1	0	0	1	9	346隻	100.0%

表-3.4 木材専用船

DW	0～5 千トン	5～10	10～15	15～20	20～25	25～30	30～	百分率
建造年								
1949年以前	0	0	0	0	0	0	0	0
1950～1954	0	0	0	0	0	0	0	0
1955～1959	1	0	1	0	0	0	0	2.2
1960～1964	2	2	1	1	0	0	0	6.4
1965～1969	5	16	3	15	2	0	0	44.1
1970年以降	6	33	0	2	1	2	0	47.3
計	14	51	5	18	3	2	0	100.0

表-3.5 旅 客 船

建造年	GT 千トン	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26
1949年以前	15	0	0	0	1	1	2	0	1	0	1	0	0	0
1950~1954	8	0	1	5	6	3	2	1	3	0	1	0	0	0
1955~1959	21	0	0	1	3	1	1	0	0	0	1	1	0	0
1960~1964	87	6	0	2	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0
1965~1969	81	7	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1970	59	6	4	1	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0
計	271	19	6	10	13	6	5	3	4	3	2	1	0	0

建造年	GT	26~28	28~30	30~32	32~34	34~36	36~38	38~40	40~42	42~44	44~46	46~48	48~50	50~52
1949年以前	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1950~1954	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1955~1959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1960~1964	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1965~1969	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1970年以降	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
計	3	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

建造年	GT	52~54	54~56	56~58	58~60	60~62	62~64	64~66	66~68	68~70	70~	計	百分率
1949年以前	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	6.0
1950~1954	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	9.4
1955~1959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	8.3
1960~1964	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	104	29.6
1965~1969	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	91	25.9
1970年以降	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	20.8
計	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	351	100.0

表-3.6 カーフエリー

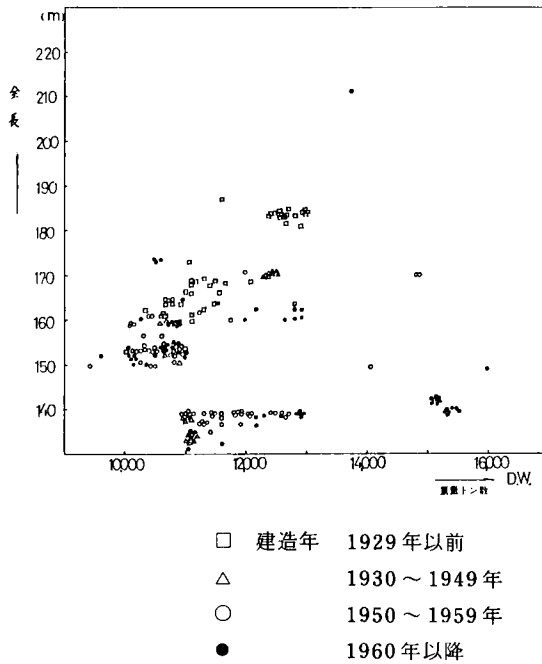
建造年	GT 千トン	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11
1949年以前	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1950~1954	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1955~1959	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1960~1964	31	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1965~1969	112	11	2	0	1	1	1	0	0	0	0	0
1970年以降	111	26	18	10	8	10	13	12	4	7	7	0
計	261	38	20	10	9	11	13	12	5	7	7	0

建造年	GT	11~12	12~13	13~14	14~15	15~16	16~17	17~18	18~19	19~	計	百分率
1949年以前	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.5
1950~1954	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.5
1955~1959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1.0
1960~1964	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	8.1
1965~1969	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127	32.2
1970年以降	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	228	57.7
計	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	395	100.0

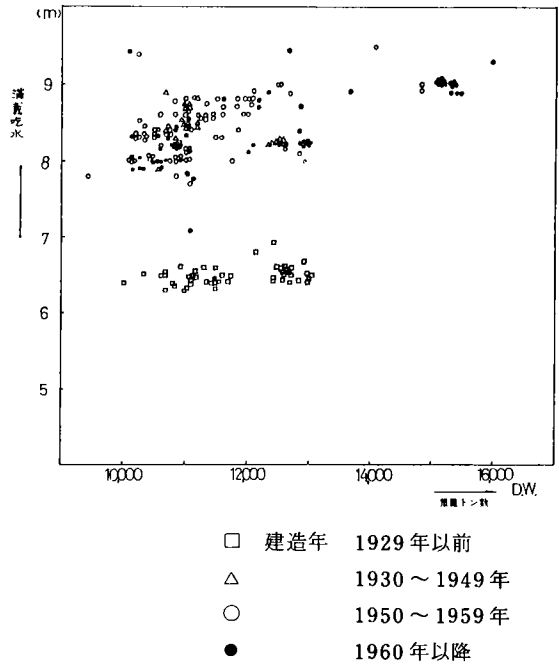
(2) 建造年による船舶寸法の相違を調べてみると、1929年以前の船舶は明らかに1950年以降の船舶とはその寸法を異にしている。1930年～1949年の船舶は、顕著な相違点は無いが多少形状変化の過渡期の様相を呈していることから、削除しても支障は無いと考えられる。これらは、貨物船の全長に関しては図－3.1に、

貨物船の吃水に関しては図－3.2に示されている。

図－3.3～図－3.8に船種別トン階別隻数を示し、図－3.9～図－3.14に船種別船齢別隻数百分率を示す。



図－3.1 船齢別全長



図－3.2 船齢別吃水

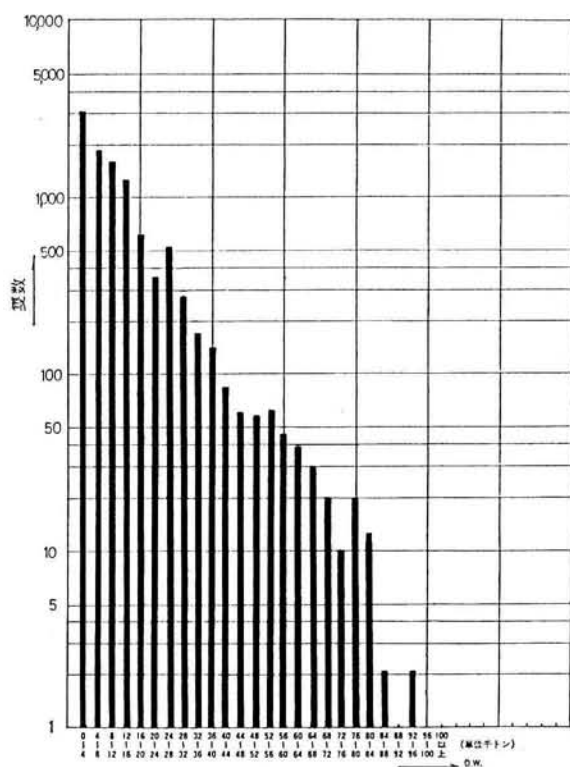


図-3.3 一般貨物船

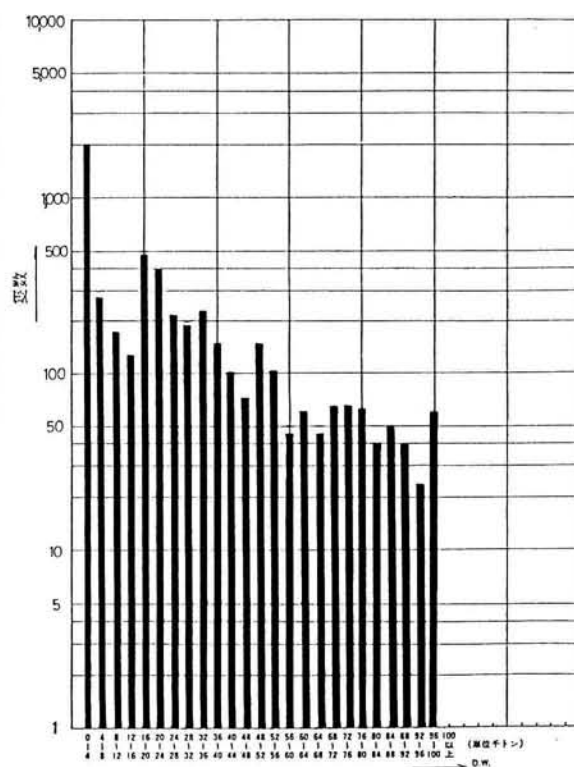


図-3.4 石油タンカー

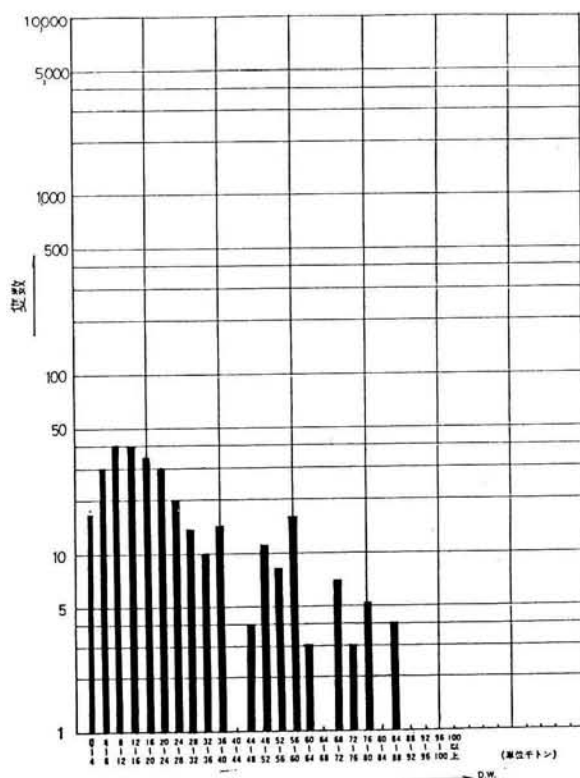


図-3.5 鉱石専用船

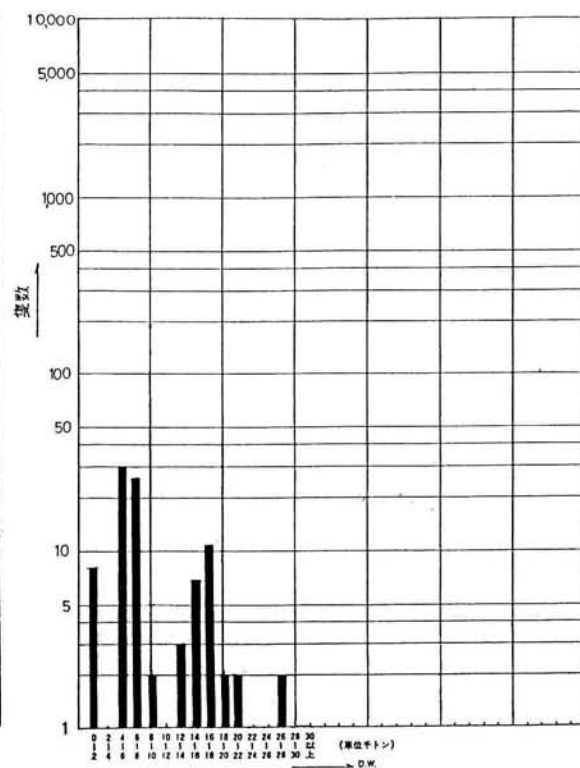


図-3.6 木材専用船

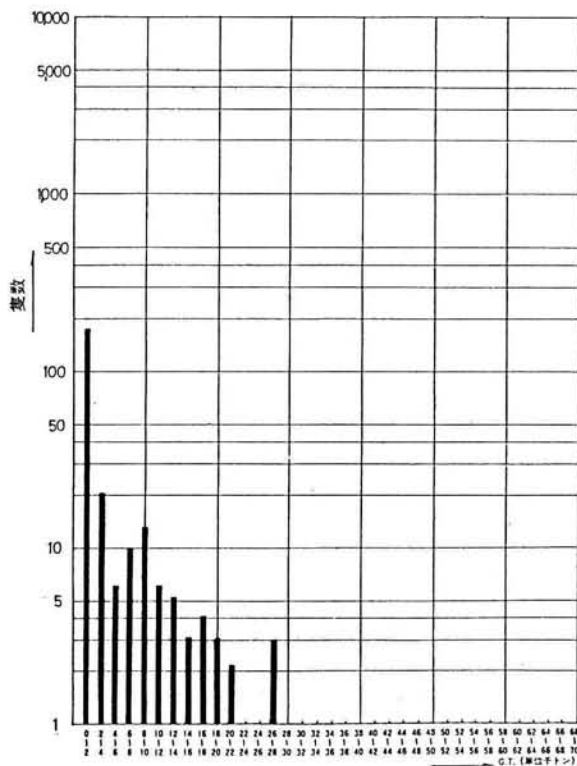


図-3.7 旅客船

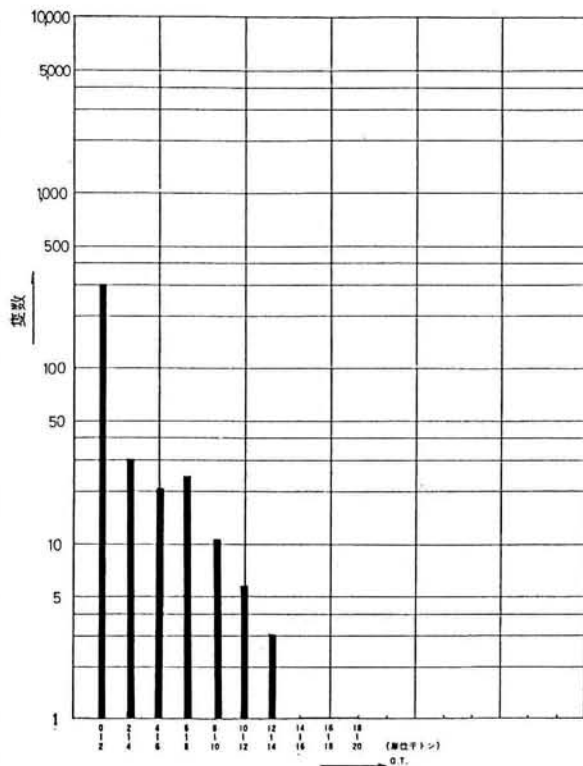


図-3.8 カーフェリー

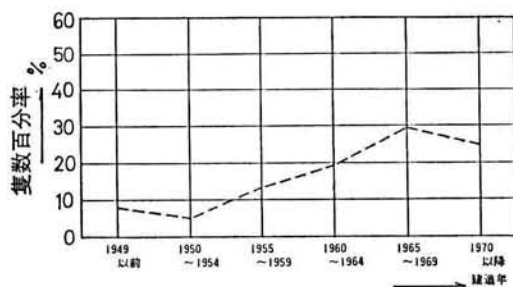


図-3.9 一般貨物船

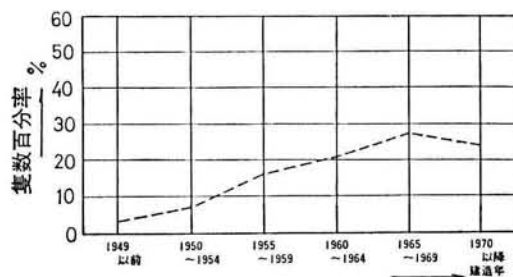


図-3.10 石油タンカー

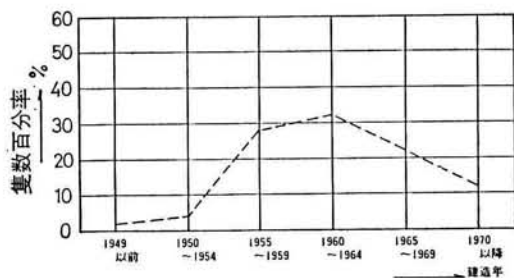


図-3.11 鉱石専用船

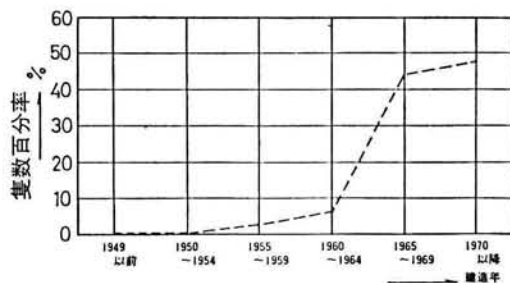


図-3.12 木材専用船

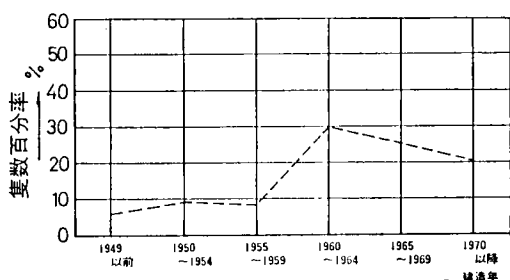


図-- 3.13 旅客船

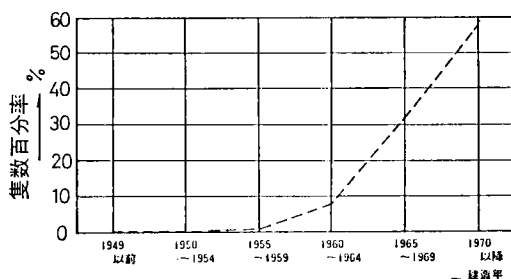


図- 3.14 カーフェリー

3.4 船舶の主要寸法の解析

3.4.1 寸法の関数形

これまで用いられてきた船舶寸法の相互関係式は、文献 3) に記載されているように、 $y = ax$ であらわされる直線をあてはめてきた。直線および曲線のどちらがあてはめとして適切かを検討する必要があるが、今回求める寸法は、過去の事例においても曲線式が直線式よりも分布傾向へのあてはめが、以下に述べる理由で適切であったために、曲線式を採用した。

- (1) 直線表示すると、一般に一方がゼロになっても他方は有限の切片を有する。このことは船型の小さい方で誤差が大きいことを意味する。 $y = ax^b$ の形で表示することによってこれは避けられる。
- (2) 計画または設計に用いる標準船型は、推定値をそのまま用いるのではなく、その大きさの船の大部分をカバーできる安全側の値をとるのが普通である。このためにデータが推定値のまわりに正規分布すると考えて、推定値に標準偏差の何倍かを加えた値を標準船型として用いることになる。直線で表わすと推定値に加える値は船型に無関係に一定となるが、常識的に推定値のまわりの分散は船の大きい方で大きいと考えることができるので、直線であらわすことは、船型の小さい方で過大の、船型の大きい方で過小の値を与えることになる。 $y = ax^b$ の形で表す場合、データの対数について回帰直線を求める作業を行えば、推定値のまわりの標準偏差はデータの対数についての標準偏差となり、その影響は緩和できる。
- (3) 回帰の推定に最小二乗法を用いるものとする、(2) で述べたように回帰のまわりの分散が変数に無関係に一定であると見なし得ない場合、すなわち不均一分散の場合には、パラメータの推定値は、不偏性、一致性、十分性はもち得ても有効性はもたない。これは、より精度のよい推定法があることを意味する。もし、デー

タの対数を変数とした場合に均一分散と見なし得るならば、このようにして回帰を推定する方が精度が高い。これは回帰を $y = ax^b$ の形で表していることになる。

3.4.2 主要寸法の分析

船舶寸法のデータの対数値を変数としたものについて以下の項目の解析を行った。

1) 回帰分析

変数の変換による非線形回帰すなわち両対数変換にしたもので分析を行う。

ここでは関数形として式 (3.1) を仮定し、パラメータ α , β の推定値 a , b を、式 (3.2) および (3.3) で求めた。

x , y は、付録 B, 付録 C にある表の標題『A と B の関係』の A, B に対応する。

$$\log y = \alpha + \beta \cdot \log x \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \log y_i - \frac{S_y}{S_x} \sum_{i=1}^n \log x_i}{n} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$b = \frac{S_{xy}}{S_x} = \frac{\sum_{i=1}^n (\log x_i - \overline{\log x})(\log y_i - \overline{\log y})}{\sum_{i=1}^n (\log x_i - \overline{\log x})} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに

- S_{xy} : 変数 x , y の共分散
- S_x : 変数 x の分散
- S_y : 変数 y の分散
- n : データ数
- $\overline{\log x}$: $\log x_i$ の平均値
- $\overline{\log y}$: $\log y_i$ の平均値

回帰のまわりの標準偏差 $\hat{\sigma}$ を式 (3.4) に示す。

$$\hat{\sigma} = \sqrt{V_{y,x}} = \sqrt{\frac{S_{y,x}}{n-2}} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left(S_y - \frac{S_{xy}^2}{S_x} \right)} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに

$V_{y,x}$: 回帰のまわりの分散

$S_{y,x}$: 回帰のまわりの変動

パラメータの標準偏差は次式による。

$$\hat{\sigma}_a = \sqrt{V_a} = \sqrt{V_{y,x} \left\{ \frac{1}{n} + \frac{(\log x)^2}{S_x} \right\}} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\hat{\sigma}_b = \sqrt{V_b} = \sqrt{\frac{V_{y,x}}{S_x}} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

ここに

$\hat{\sigma}_a$: a の標準偏差

$\hat{\sigma}_b$: b の標準偏差

V_a : a の分散

V_b : b の分散

関数形におけるパラメータ β の推定値 b に対しての母回帰係数 $\beta = 0$ という仮説の検定は以下のように行った。すなわち回帰係数がある危険率でゼロにならないことを示すために

$$t_\beta = b / \hat{\sigma}_b \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

が自由度 $\nu = n - 2$ の t 分布に従うことを利用して検定する。危険率が 0.1 % の場合はその判定条件は、

$$t_\beta > t(n-2, 0.001)$$

である。

2) 相関分析

変数 x , y の相関係数 r は式 (3.8) で与えられる。

$$\begin{aligned} r &= \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x \cdot S_y}} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n (\log x_i - \overline{\log x})(\log y_i - \overline{\log y})}{\sum_{i=1}^n (\log x_i - \overline{\log x}) \sum_{i=1}^n (\log y_i - \overline{\log y})} \quad \dots\dots\dots (3.8) \end{aligned}$$

母相関係数 ρ がゼロであるという仮説を検定する。

$$t_r = \frac{r \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

が自由度 $\nu = n - 2$ の t 分布に従うことを利用して

$$t_r < t(n-2, 0.001)$$

であるならば、危険率 0.1 % で仮説を棄却できることになる。すなわち $\rho \neq 0$ ということになり、逆に

$$t_r < t(n-2, 0.001)$$

で仮説を棄却できない場合には、回帰の推定は行わない。

なお、計算結果および結果の図は、膨大であるので、付録 B にまとめた。

3.4.3 従来値と見直し値の比較

今回行った見直し回帰曲線に対し、従来の船舶形状値（港湾構造物設計基準の値）が何パーセントにランクされているかチェックしたものを図-3.15～図-3.19 に示し、さらに 75 % の回帰曲線に対しその値の正負の最大値を表-3.7 に示す。ただし従来値が見直し値の 75 % 値を下回る場合には、 Δ の絶対値を負にしている。

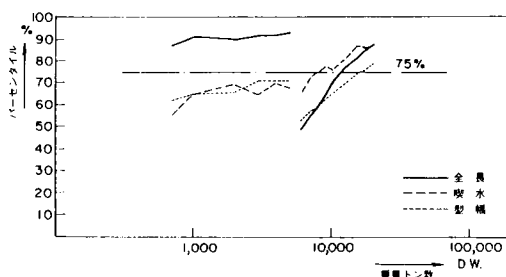


図-3.15 一般貨物船

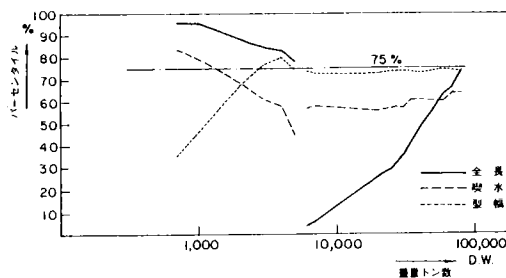


図-3.16 石油タンカー

表-3.7 差の上下限值

諸元 船種	船 長		吃 水		型 幅	
	Δl_{max}	Δl_{min}	Δd_{max}	Δd_{min}	Δb_{max}	Δb_{min}
一般貨物船	6 m	-12 m	0.4 m	-0.2 m	0.7 m	-0.2 m
石油タンカー	4 m	-9 m	0.1 m	-0.4 m	0.2 m	-0.6 m
鉱石専用船	2 m	-8 m	-0.1 m	-0.4 m	0.2 m	-0.2 m
旅客船	-1 m	-17 m	1.1 m	-0.5 m	2.1 m	-2.0 m
カーフェリー	5 m	-5 m	0.2 m	-0.5 m	0.7 m	-3.0 m

ここに $\Delta = (\text{見直し値}) - (\text{従来値})$

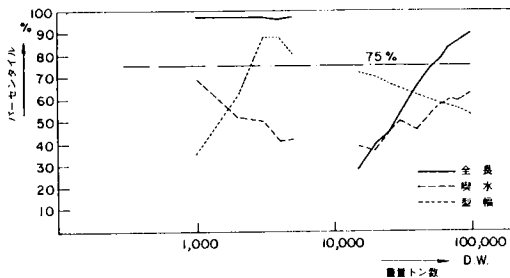


図-3.17 鉱石専用船

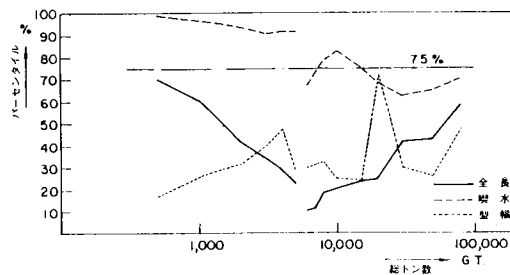


図-3.18 旅客船

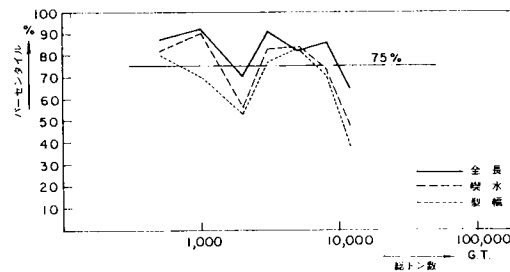


図-3.19 カーフェリー

この結果から判断すると、(+)の値はオーダー的に問題を起すことはないが、(-)の値は全長については貨物船の $\Delta L = -12\text{ m}$ 、旅客船の $\Delta L = -17\text{ m}$ は支障がありそうである。吃水については、表-3.7の全船種で問題がある。しかしながら、各船種ともトン階領域における一部のトン階で問題があるということであるから、安全対策上は、曲線式および船型分布などから判断して比較的容易に対応はとれるものと判断される。すなわち、現行のバース諸元のままで、運用によって十分安全を確保しつつ、見直し値による形状の船舶が係岸できる場合もありうるということである。

また現行のバース諸元に対し、見直し回帰式を用いて求めた船型をあてはめると、表-3.8となる。ただしこの値は単純に曲線から求めたもので、利用実態、船型分布などを考慮していないし、余裕水深も吃水の1割を考慮した場合であることおよび回帰式のパーセンタイルも一率75%としていることを考え合わせれば、実際の港湾計画上では、表-3.8で示す見直し値をそのまま採用する必要はなく、十分その港に合った適切な判断のもとに対象船型を決定していけばよく、従来どおりで現状に対応可能なケースも多いと思われる。

表－3.8 現行バース諸元に対する対象船型比較表

船種 バース水深	一般貨物船		石油タンカー		鉱石専用船		木材専用船		旅客船		カーフェリー	
	見直し値	従来値	見直し値	従来値	見直し値	従来値	見直し値	従来値	見直し値	従来値	見直し値	従来値
－4.5 M	740 D.W.	700 D.W.	760 D.W.	700 D.W.	—	—	780 D.W.	700 D.W.	620 G.T.	500 G.T.	—	—
－5.0	1,100	1,000	1,200	1,000	—	—	1,200	1,000	1,000	1,000	2,200	—
－5.5	1,700	2,000	1,750	2,000	—	—	1,900	2,000	—	—	3,300	—
－6.0	2,300	3,000	2,300	3,000	—	—	2,600	3,000	—	—	—	—
－6.5	—	—	—	—	—	—	—	—	2,400	3,000	5,100	—
－7.5	4,800	5,000	4,700	6,000	4,800	6,000	5,300	5,000	3,500	5,000	10,000	—
－9.0	9,200	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	11,000	10,000	7,400	10,000	—	—
－10.0	12,500	15,000	14,500	17,000	15,300	15,000	16,000	15,000	14,900	20,000	—	—
－11.0	19,100	20,000	21,100	25,000	22,500	25,000	22,000	20,000	23,200	30,000	—	—
－11.5	—	—	—	—	—	—	—	—	36,500	50,000	—	—
－12.0	26,900	30,000	29,000	35,000	32,500	40,000	30,000	30,000	—	—	—	—
－13.0	36,300	50,000	39,000	45,000	45,000	50,000	—	—	60,000	80,000	—	—
－14.0	—	—	52,000	65,000	—	—	—	—	—	—	—	—
－15.0	—	—	67,000	80,000	81,000	80,000	—	—	—	—	—	—

注) 見直し値は75パーセンタイルの値で、バース水深及びバース長の両方を満足できる船型となっている。

従来値のうちタンカーについては85パーセンタイル値となっているがそれ以外は75パーセンタイル値である。

3.5 船舶のマスト高

最近のように輸送体系の高速化の要請が高まってくると輸送手段の改良のみでなく輸送路の短縮化も余儀なくされる場合も生じ、その中でも陸上交通の要ともいえるべき自動車輸送路の短絡化は早くから要求されていた。港湾区域および海峡などでは地形の関係で海上横断路の要請が当然ながら多い。こうした横断路の計画にあたっては橋梁下を大小さまざまな船舶が通過することから桁下高については船舶マスト高の解析が必要である。

ここでは、国内船および外国船を問わず、過去20年間にわたって建造された船舶について極力資料を収集し、検討を加えた。調査項目は、船名、船籍国、船種、建造年、GT、DW、満載吃水、バラスト吃水、型幅、甲板マスト高の10項目で、それらにより水面上マスト高を算出している。ただし、船種については資料が造船会社の設計図面ということもあり、収集が比較的困難であったことから広範囲に集めることが難しく3.3で示したように5船種とした。またバラスト吃水については、無記載で不明なものも見られたことから、比率によって仮定して値を求めたものもある。

収集データ数は次のとおりである。

一般貨物船	315隻
石油タンカー	132隻
フルコンテナ船	24隻
旅客船	56隻
カーフェリー	31隻

3.5.1 マスト高の考え方

ここで考えるマスト高とは水面から船舶の最も高い位置を指すが、その高さは当然のことながら船舶の載荷状態によって異なる。軽荷吃水時が最も高くなるが、運航時を考えればバラスト（空船）時吃水を考えるのが適切である。しかしながら運航中の船舶は積荷状態により操船上から船首吃水を船尾吃水より浅くして運航する傾向があり、特にバラスト時吃水に近くなるほど比較的大きなトリムをつけて、推進力、かじ効きの減少を防ぐようにしているし、航行海域の波高によっても船舶のマスト高は静水面に対し上下する。したがって船舶独自のマスト高以外のこれらの影響要素については、クリアランスを決める上で重要であるので、3.5.2以下で述べることにする。

3.5.2 海上横断工作物と船舶とのクリアランス

船舶の最頂部と横断工作物下部とのクリアランスは、

各種気象条件によっても影響されるし、操船者の心理的影響によっても左右されるもので、クリアランスを定量化することは非常に難かしいが、おおよその考え方を次に示す。

1) 高圧線とのクリアランス

高圧線を港湾水面上あるいは航路水面上に架け渡すような場合には船体最頂部と高圧線との間の絶縁のためある程度の余裕を確保しておかなければならない。この余裕としては通常 5 m 程度といわれているが、橋梁の場合にはこのような心配はない。

2) 橋梁と船舶とのクリアランス

橋梁の下を船舶が通過する場合は、操船者が心理的影響を受けることは過去の調査で明らかであるが、それを定量化することは困難である。過去の事例によれば種々の条件を考慮した結果、余裕として 2 m 程度見込んでいるケースがほとんどである。最悪の場合には、実際に見られるように、マストの突端を引っ込めて通過させることも考えあわせれば、通常の船舶の場合は 2 m 程度でよいと考えられる。

巨大船を対象にする場合は別途考慮する必要がある。

3) 船舶のトリム（船首と船尾の実吃水の差）

マスト高はトリムによって水平時（even keel）の場合より増加するが、その量はトリムの量全体でなくマストの位置が船首から測って、船の全長に対して何割の処にあるかの比率によって決まるものである。主マストの取付位置は、造船学上明確なる基準はないが同一船舶トン数でマストが高い船型とは、一般的傾向として中央にブリッジのある船で、このような船舶では主マストの位置は船首から船長の 1 割 5 分から 2 割の距離にある。またその大きさもほぼ海上横断工作物との余裕高（約 2 m）に含まれる範囲にある。したがって 2 m の余裕高を考慮した場合は、特殊なケースを除いて特にトリムを配慮する必要はない。

4) 波高

波高も船舶の上下動に影響する要素であるが、船舶の全長が波長の半分以上である場合はほとんど波の振幅の影響を受けずあまり問題はない。それ以下の場合は、船舶は発生波高の 1/2 近く上下動する。しかしながら一般的に架橋地点の水深、地形および通過条件等を考え合わせればそのような状態となるケースは、小型船か特殊な気象条件下の場合に限られること、および過去の事例でもほとんど考慮されていないことから、一般的には考慮する必要はないと考えられる。

5) 基準水面

海水面は潮せきによって変動するため、基準をどこに

おくかが問題となる。従来は桁下高を海図上に示す場合に一定の規準がなかったが、国際水路会議（IHO）の決議で可航水域上の橋梁の高さを図示する場合には「最小垂直間隔を示さなければならない。」という取決めがなされ、それを略最高高潮面（H.H.W.L.）とすることに決定したことから海上保安庁水路部によっても本州四国連絡橋の計画を契機として橋梁の水面上の高さを表す基準として略最高高潮面を採用することが確認され、今後はこれを基準水面としていくことが望ましいと考えられる。ここでいう略最高高潮面とは、平均水面上主要四分潮（ M_2 , S_2 , O_1 , K_1 ）の半潮差の和に相当する水面である。したがってこの潮位は平均水面上分潮（ M_2 , S_2 ）の半潮差の和に相当する水面であるさく望平均満潮面よりも高潮位である。

ここに M_2 ; 太陰半日周潮

S_2 ; 太陽半日周潮

O_1 ; 太陰日周潮

K_1 ; 日月合成日周潮

3.5.3 データ処理

データ数が多い場合には、全データを同時に処理して総合回帰曲線式を求めるのが好ましいが、マスト高についてはデータ数が少ないためデータの分布が不均一で分布形が曲線式にうまく適合しない。したがって処理の方法としてはデータの分布傾向が異なっていると判断される範囲でデータ群のグルーピングを行った。明確な差が生じない場合は、全データより求めた総合回帰曲線と傾向が合わない範囲などを抽出し、トン階でデータ群を分類し、それぞれ回帰曲線を求めた。ここで、曲線式のパーセンタイル値をどの程度にすればよいかということが問題となる。橋梁にとって経済的で船舶側にとって安全な領域というものは判然としない。しかし、極力安全性を重視する意味で、処理するデータのうち各トン階範囲ごとの回帰曲線式（50パーセンタイル式）に対し、一番離れた最大値を持つ船を対象にその値から 2 m 下側に曲線式が近似するよう曲線式を修正した。この 2 m の根拠は 3.5.2 で示したように 2 m の余裕を設ければ、データ中最大値を持つ船であっても極限状態で架橋地点などを通過できるように考えているもので、現実には潮せき、バラスト吃水時の発生確率などを考え合わせれば、安全な状態におかれていると判断される。またトン階の境界において生じる曲線と曲線のギャップは不連続のままでは不具合なので、データ群の分布傾向および安全側となるよう配慮しながら曲線の外挿を行って連続曲線式とした。

したがって曲線式を求める順序としては、

(50%回帰曲線式)→(最大離心値近似曲線式)

→(すり合わせ修正曲線式)

となっている。よって求められた最終結果の式にはパーセントailsの考え方は入っていないことになる。

なお、計算結果および結果の図は、膨大であるので、付録Cにとりまとめた。

3.6 結言

今回解析した船舶寸法は、約6万隻の船舶が記載されているロイドレジスターおよび約1万隻の日本船舶明細書を基にして、全船舶の主要寸法をカード化し、そのうちの解析対象船舶約14,000隻のデータを利用したことから結果の信頼性は高い。しかしながらすべての船種、項目を網羅しているわけではないので、今後は今回の解析の対象にしなかった項目についても範囲を広げていく必要があろう。また、上記2船舶録に記載されていない項目であるマスト高についても収集資料数をさらに増やして解析していく必要はあろう。そのためにも多くの港湾関係者に利用され、要望、問題点の指摘をされることを切望する次第である。

この種の調査研究は、非常に労力を費やすわりには評価が低いようである。しかし研究成果の有用性に関しては万人の認めるところであり、「データを読め」の言葉に表わされるように、下手な解析よりも結果の図面を眺めるだけで莫大な計画情報が得られよう。

本章の研究により得られた成果は、以下のとおりである。

- (1) 船種・船型別の船舶隻数比が明らかにされた。
- (2) 船型・船齢別の船舶隻数の経年変化が明らかにされた。
- (3) 船種・船型別に、重量トン数および総トン数の回りの船舶の全長、満載吃水、型幅、総トン数または重量トン数、純トン数の回帰曲線が得られた。
- (4) 上記の各対の相関図が得られた。
- (5) マスト高の考えかたが明らかにされた。
- (6) 船種・船型別に、総トン数の回りの船舶のマスト高の回帰曲線が得られた。
- (7) 上記の各対の相関図が得られた。
- (8) 1929年以前と1950年以後では船舶の寸法は明らかに異なっている。その間の1930～1949年は過渡期の様相を呈し、船舶の寸法は経年変化している。

参考文献

- 1) 片山猛雄，降旗健一，本浩司，早藤能伸：船舶諸元の相互関係，港湾技研資料No. 101，1970年。
- 2) 久保重美，工藤和男：着岸船舶の実吃水についての調査，港湾技研資料No. 144，1972年。
- 3) 港湾構造物設計基準，運輸省港湾局，1967年。
- 4) 飯田秀雄：コンテナ輸送の理論と実際，成山堂，1968年。
- 5) 山口増人：船の常識，海文堂，1966年，pp. 127～276。
- 6) 長尾義三：港湾工学，共立出版，1968年，pp. 202～206。
- 7) 船の科学，船舶技術協会，1965年～1977年。
- 8) 船舶，天然社，1963年～1977年。
- 9) 若戸橋調査報告書，日本道路公団福岡支社，1963年。
- 10) 本四架橋予定地の航路高に関する調査報告，日本海難防止協会，1971年。
- 11) 本州四国連絡橋の桁下高に関する調査報告，日本海難防止協会，1972年。
- 12) トン数と船舶設計との関連に関する調査研究報告書，日本造船研究協会1977年。
- 13) 日本船舶明細書，日本海運集会所，1976年。
- 14) Register of Ships, Lloyd's Register of Shipping Trust Corporation Ltd, 1975。

4. 水路の交通容量モデル

4.1 緒言

海上交通においては、広大な水域を船舶が自由に航行する場合と、地形による制約や海上工事による水域の制限等、何らかの理由によって、一船しか航行することのできない場合が、交通環境の両極端として存在する。海上交通の場である水域における交通流のボトルネックは、後者の条件の厳しい場所で決定される。この点に関しては、海上交通も陸上交通と同様で、そのような条件の厳しい場所において、船舶交通が被る影響、例えば、その場所の交通容量に対して飽和するか否か、また混雑の度合いはどの程度か等の計画情報は、海上交通計画を作成する計画担当者が、より良い計画を作成するための必須な情報である。

本章では、このような交通環境の厳しい場所において船舶交通が被る影響に関する計画情報を考察する。したがって、本章で取扱う水路は、水路幅が狭く一船しか通航出来ない片道通航水路とする。片道通航水路は港湾における船舶の出入口に生じたり長大運河に多く見られ、日本各地、世界各地に数多く存在する。このような片道通航水路は、当然のことながら、往復通航の水路と比較すると交通容量は小さく、船舶交通量が増加すると、交通渋滞が生じ、海難多発の危険性の増大を招き、交通水路としての機能が減少する。

したがって、新たに水路を計画したり、既往の水路を改善するにあたっては、その水路を片道にするか往復にするかを決定することが重要である。往復航路にする場合でも、水路全体を往復可能とするか、あるいは途中の一部のみに限定するかといった検討が必要である。さらに一部のみに限定したときには、往復可能水域において単純に反対方向へ進航する船舶とすれちがわせるだけに留めるか、すれちがいをより効果的にするために、船舶の待機場所を設けて、船舶を一旦停止させて待機させる方法をとるかといった問題も生じ、これらの代替案における交通容量や混雑度の変化をあらかじめ検討する必要がある。また後述するような通航方式も決定せねばならない。

このような目的の下で、交通容量の考察を4.2で、併航が不可能で比較的交通量の少ない水路において、人為的な管制を行わない場合の評価を4.3で、交通量の多い場合に片道通航水路の交通容量を増大させるためにとられる各種代替案に対する交通容量の評価を4.4で、その場合の待ちを4.5で評価する。

4.2 小交通量モデル

4.2.1 概説

水路を計画する場合に船舶交通量が少なく、水路交通所要時間が短く、かつ視界のよい場合は、水路を片道通航水路で計画しても、船舶交通上とくに支障があるとは思われない。

しかし、片道通航水路においては、当然のことながら反対方向へ向う船舶と同時に水路を利用することはできない。船舶が水路を通過しているとき、その逆方向へ向う船舶が水路に到着しても進入できずに、水路進航中の船舶が水路を通航完了するまで待たねばならない。この“待つ”という現象によって、待ち時間、待ち隻数、および待ち場所の問題が発生する。交通量が少ない場合には支障がないと述べたものの、待ちが生ずるならば、待ちに関する統計量をあらかじめ推定し、何も問題が生じないことを確認しておくことは、計画に非常に重要である。また、交通量が現在時点で少なくとも将来に交通量が増加する場合には、何時の時点から片道通航水路では支障が生じはじめるかを予測しておくことも、水路計画に必要不可欠な計画情報である。

そのために、4.2では、外部から何らの規制も与えずに、通過船舶に水路の通航をまかせるという最も単純な場合を考察する。当然、交通量の増大に応じて何らかの管制を設ける場合、さらには水路を拡張して二船以上の併航を可能とする場合等を段階的に考察するが、それらは4.3で取扱う。

なお、4.2で取扱う片道通航水路は図-4.1とし、途中に複線部分がなく、水路内では逆方向に進む船舶はすれちがい不可とする。逆方向に進む船舶が水路を通航していき水路入口で待たねばならない場合は、図-4.1のAまたはBで待つこととする。

この場合、混雑の程度は交通量と船舶の水路通航所要時間によって、異なるばかりでなく、通航方式によっても異なる。

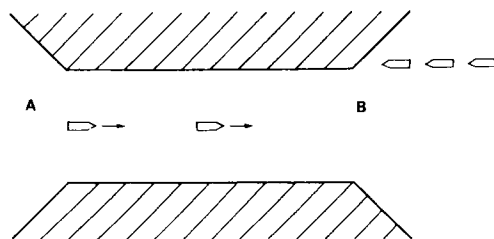


図-4.1 片道通航水路

通航方式とは、もっとも単純な

『水路の入口であるAまたはBに到着した時刻の早い順に水路へ進入する方式（先着順方式）』

先着順方式ではなく一方のみに優先権を持たせる

『AからBへ向う船舶は常に水路進入の優先権を有しており、BからAへ向う船舶は優先方向の船舶と水路A・B内で遭遇しないことが確認されたときに限って水路へ進入可能とする（一方優先方式）』

水路進入の優先権は方向で決まるのではなく

『新たに水路の入口AまたはBに到着した船舶の進航方向が水路を通航している船舶と同方向であるならば進入可能とする（同方向優先方式）』

等の水路通航の方法である。

ここで、先着順方式の場合には異なった方向から交互に船舶が到着すると方向が逆転する際に生じる時間の損失が大きすぎて現実的ではなくなることから考察の対象から外し、一方優先方式を4.2.2で、同方向優先方式を4.2.3で考察する。

4.2.2 一方優先方式

片道通航水路の通航にあたって、到着した船舶が両方向から水路へ進入することが不可能な場合、常に一方に水路進入の優先権を与えて、反対方向に進む船舶は水路通航中に優先方向の船舶と出会わないということが確認されない限り、水路への進入が不可能な一方優先方式を本項で考察する。

この方式は、空港における航空機の離発着の際に、着陸機の滑走路使用を優先し、離陸機は着陸機の到着しない時間に滑走路を使用させる方式と全く同一である。海上交通においても、海域に航路が設定されていて、その航路を横断する船舶は航路を航行する船舶の航行を妨害してはならないといった場合は、飛行場の離発着の例と同じく一方優先方式であり、以下に述べる方法が適用可能である。

一方優先方式では、優先方向の船舶は待ち時間なしで通航可能であるから、非優先方向の通航船舶のみが待ちの対象となる。

水路に到着した非優先船の水路進入までの待ち時間 w は、優先船の水路通航所要時間を t_p 、非優先船の水路通航所要時間を t_n とすると、優先船のひき続いた二船の船間時間間隔が $t_p + t_n$ より大となるgapがあらわれるまでの時間である。すなわち、非優先方向の船舶が水路に進入可能であるためには、優先方向においてひき続いて到着する船舶の到着時間間隔が優先方向船の水路通航時間 t_p と非優先方向船の水路通航時間 t_n の和 $t_p + t_n$ より大なることが必要であり、そのときに限って非優先方向

の船舶は水路へ進入することが可能となる。したがって、非優先船の水路進入可能となるまでの待ち時間 w は、ひき続いて到着する優先船の到着時間間隔が $t_p + t_n$ より大となるまでの待ち時間に等しく、 w の分布は再生理論（Renewal Theory）により解析が可能である。そのため

T : 優先方向を航行する船舶の船間時間間隔を表す確率変数

$F(t)$: T の累積分布関数 $P_r(T < t)$

ξ : 時間幅 $t_p + t_n$

w : 優先船が水路へ進入した瞬間から ξ 以上の船間時間間隔が現れるまでの待ち時間を表す確率変数

W : $W = w + \xi$ で定義される確率変数

$V(t)$: W の累積分布関数 $P_r(W < t)$

とする。

ここで、 $V(t)$ は、 W が必ず ξ より大であることから

$$t < \xi \text{ に対しては } V(t) = 0$$

を得る。

$\xi \leq t$ に対しては、

2船目の優先船が到着するまでの時間間隔を T_1 として、 $T_1 > \xi$ および $T_1 = x \leq \xi$ という互いに排反な場合を考えると、

$T_1 > \xi$ の場合は待ち時間 W は ξ に等しく、

これは確率 $P_r(T_1 > \xi) = 1 - F(\xi)$ で生起する。

$T_1 = x \leq \xi$ の場合には、時間を第2船の進入時刻 x まで進めてスタートから出発し直し、 $T_1 = x$ が与えられたときに $W \leq t$ の（条件つき）確率は、

$V(t)$ を用いて $V(t - x)$ となる。

すべての可能性にわたって加えると、

$$V(t) = 1 - F(\xi) + \int_0^{\xi} V(t - x) dF(x) \quad (t \geq \xi \text{ のとき}) \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

を得る。

船舶交通流がランダムである場合、すなわちポアソン流であり、船間時間間隔で見ると指数分布間隔である場合には、上で W を求めたときの始まりの時刻は任意の時刻でよいから、その時刻を非優先船の到着時刻にとることにより、 $W - \xi$ が非優先船の進入までの待ち時間となる。

このときは、 $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ (λ は単位時間あたりの優先船の平均到着数、すなわち、優先船の平均船間時間間隔が $1/\lambda$)であるから、上式とモーメントを求め方法によって、

$$E(W) = (e^{\lambda\xi} - 1) / \lambda \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$V(W) = (e^{2\lambda\xi} - 1 - 2\lambda\xi e^{\lambda\xi}) / \lambda \dots\dots\dots (4.3)$$

を得る。¹⁾⁹⁾

$E(W)$, $V(W)$ は、 W の平均と分散であるが、実際
の非優先船の進入待ち時間 w については、 $W = w + \xi$ よ
り、 W から t_n を減ずれば求まり、平均待ち時間

$$E(w) = (e^{\lambda\xi} - 1) / \lambda - t_n \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

が得られる。

w の分散 $V(w)$ に関しては、 t_p , t_n が定数である限
り、 W の分散と一致する。

この式を用いて、ひき続いて到着する優先船の時間隔
が T 分以上になるまで待つ平均待ち時間を、 T を 5 分
から 100 分まで 5 分刻みで、横軸に優先船の 1 時間当
りの平均交通量 λ を 0.5 隻から 3 隻まで、縦軸に平均
待ち時間 $E(w)$ をとって、図-4.2 に示した。

図-4.2 より、優先方向船非優先方向船ともに水路通
過時間を 20 分とし、優先方向の船舶の平均交通量が 2
隻とすると、横軸の 2.0 と 40 分の曲線との交点の縦軸
の座標を読んで、この場合の平均待ち時間は、0.73 時間
と与えられる。

この場合、到着した非優先船の前に既に他の非優先船
が水路進入待ちをしている場合には、非優先船側の船舶
の船間時間 t_0 が 0 ならば上の方法で適用可能である。

船間時間 $t_0 > 0$ の場合は、計算が複雑になり注意を
要する。すなわち、 k 隻の非優先船が新たに到着した非
優先船の到着前に既に水路進入待ちをしている場合は新
たに到着した非優先船も含めた $(k+1)$ 隻の水路通過
時間は、 $t_n + k t_0$ であり、これら k 隻の待っている船

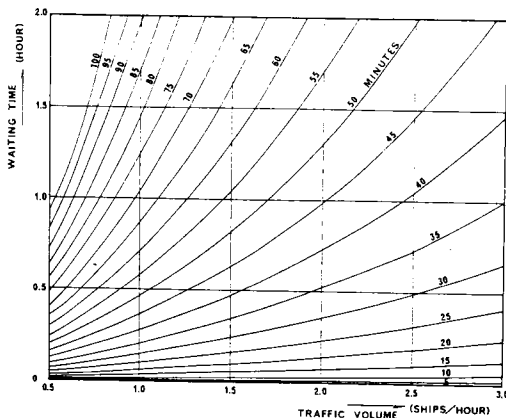


図-4.2 一方向優先入航

船が同時に水路へ進入できるまでの待ち時間は、優先船
の水路通過時間 t_p を加えて、ひき続く優先船間の gap
が $t_n + k t_0 + t_p$ より大となるまでの待ち時間であり、
この値は図または上式を用いて求められる。しかし、実
際には k 隻が水路へ同時に進入可能である必要はなく、
1 隻目は $t_p + t_n$ の gap で進入可能だから、gap の大き
さが $t_p + t_n$ より大の gap が出れば、待ち船の何隻
かは進入可能となるのである。これらの計算はさらによ
り高度な解析を必要とし、数学的には興味深く解析解を
求めることが不可能ではないが、実際の現象において、そ
のような場合が頻繁に生ずるということとは非優先方向の
船舶交通量が大きくなることであり、水路通航不可能とな
ってしまうことから、本節では交通量が少ない場合と断
ってその評価はここで打ち切る。

4.2.3 同方向優先方式

一方向のみを優先する場合を 4.2.2 で考察したが、交
通量が大きとなると非優先船の船間時間間隔を 0 としても待
ち時間が飛躍的に増加して、非優先船の水路通航は困難
となることが判明した。したがって、両方向のどちらも
優先をつけずに、同等に扱う場合を本項で取扱う。

しかし、既に述べたように水路の入航順を先着優先と
すると、水路を進航する船舶の方向の交代が多くなるこ
とによって、いたずらに水路進入待ち時間が大きくなる。

したがって、両方向のどちらにも優先権を持たせない、
より一般的な水路進入方法として、新たに水路へ到着し
た船舶は、水路内を航行している船舶の進行方向が自船
と同方向の場合には入航可能で、そうでない場合、すな
わち反対方向の船舶が水路内を航行中の場合には反対方
向の船舶が完全に水路を通過完了して水路が空くまで入
航待ちをするという場合を考察した。この場合の入航待
ちを解析するにあたって、次の i) ~ V) の仮定を設ける。

i) 水路 A B (図-4.1 参照) を通航中の船舶が存在
しない場合は、A または B に到着した船舶は水路へ
進入可能とする。

ii) 水路内を航行中の船舶が存在する場合は、A また
は B に新たに到着した船舶の進航方向が水路内航行
中の船舶の進行方向と同方向ならば到着船舶は水路
進入可能とするが、反対方向の場合は水路入口の A
または B で待機する。

iii) 待機している船舶は、反対方向へ進む船舶が水路
を通航し終って水路が空いたとき進入可能とする。

以上、i), ii), iii) を満足する水路進入可能条件を
水路内進航方向優先方式、もしくは、同方向優先方式と
よぶ。

さらに、実際の解を求めるための条件として iv), v),

VI) を付加する。

IV) A または B で待機する船舶の最大許容隻数を m 隻とする。すなわち、A または B に m 隻の船舶が待機しているときに新たな船舶が到着した場合、その船舶は待ち行列に加わずに、立ち去るものとする。

V) 船舶は、A、B にランダムに到着するものとし(ポアソン到着)、単位時間内に到着する船舶の平均隻数は、おのおの λ 、 μ とする。

VI) 水路通過に要する時間は、A、B 両方向とも、平均 $1/\nu$ 、標準偏差 σ の正規分布(実際の解析にあたっては、フェーズ n のアーラン分布で近似する。したがって平均は $1/\nu$ 、標準偏差 σ は $1/(\sqrt{n}\nu)$ となる)に従う。

これらの条件をもとに待ち合わせ理論を適用して待ち隻数や待ち時間が以下のようにして求められる。以上の仮定のうち、VI) の平均 $1/\nu$ 、フェーズ n のアーラン分布とは、平均が $1/(n\nu)$ の n 個の独立な指数分布の和の分布であるから、結局水路通過所要時間は、サービス時間の平均値が $1/(n\nu)$ の直列に並んだ n 個の指数分布に従うサービス窓口を順番に通る、 n 個のすべてのサービスを終了するまでの時間に等しい。このとき、 j 番目のサービス窓口のサービスを受けている状態をフェーズ j にいるとすると、水路に船舶が存在している状態は次の $2n(m+1)$ 個の状態に分類することが可能である。すなわち、

E : 水路が空の状態

A_{ij} : 水路内に (A \rightarrow B) 方向の航行船舶があって、最後尾の船舶(最も A に近い船舶)が j 番目のフェーズにいて、B で (B \rightarrow A) 方向の船舶が i 隻待っている状態 ($0 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$)

B_{ij} : 水路内に (B \rightarrow A) 方向の航行船舶があって、最後尾の船舶(最も B に近い船舶)が j 番目のフェーズにいて、A で (A \rightarrow B) 方向の船舶が i 隻待っている状態 ($0 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$)

である。

ここで、A、B に到着する船舶の到着時間隔はおのおの平均 $1/\lambda$ 、 $1/\mu$ の指数分布であり、通過時間に関しては、両方向とも n 個のフェーズにまで分割すると、おのおのフェーズに滞在する滞在時間分布は平均 $1/(n\nu)$ の指数分布であることから、任意の時刻から微小時間 Δt の間に A、B に到着する確率はおのおの $\lambda \Delta t$ 、 $\mu \Delta t$ であり、各フェーズから出る確率は $n \nu \Delta t$ で与えられる。

これは、 T が平均 $1/a$ の指数分布に従う、すなわち

$$P_r(T < t) = 1 - e^{-at} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

とすると

$$\begin{aligned} P_r(T < \Delta t) &= 1 - e^{-a\Delta t} \\ &= 1 - (1 + a\Delta t + (a\Delta t)^2/2! + \dots\dots\dots) \\ &= a\Delta t + o(\Delta t) \sim a\Delta t \quad \dots\dots\dots (4.6) \end{aligned}$$

であること、および指数分布は時間の履歴に関係ないことによる。

したがって、微小時間 Δt における各状態間の推移確率図は、図 - 4.3 となる。

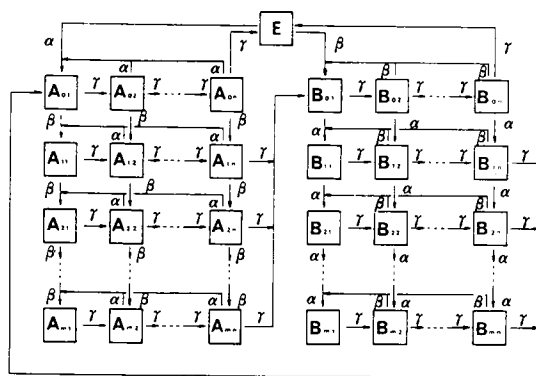


図 - 4.3 微小時間 Δt における推移確率図

図中の α 、 β 、 γ は、

$$\alpha = \lambda \Delta t, \quad \beta = \mu \Delta t, \quad \gamma = n \nu \Delta t \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

であり、 α 、 β はおのおの A、B 地点への船舶の到着確率であり、 γ は (A \rightarrow B) 方向および (B \rightarrow A) 方向の船舶が存在しているフェーズから出る確率である。当然のことながら、(1 - (他の状態への推移確率の総和)) は、 Δt 間に自身の状態に留まる確率である。

したがって、時刻 t において水路が、E、 A_{ij} 、 B_{ij} の状態である確率を、おのおの $e(t)$ 、 $a_{ij}(t)$ 、 $b_{ij}(t)$ と記すと、微小時間 Δt の間に、例えば、

E の状態で考えると、 Δt より高次の無限小を無視することにより、

- E \rightarrow A_{01} は確率 $\lambda \Delta t$ で起こり、
- E \rightarrow B_{01} は確率 $\mu \Delta t$ で起こり、
- E \rightarrow E (変化なし) は確率 $1 - \lambda \Delta t - \mu \Delta t$ で起こる。

その他の推移は Δt の高次の無限小となることから無

視できる。

一方、Eへ移ってくる推移は、

$A_{0n} \rightarrow E$ が確率 $n\nu \Delta t$ で、

$B_{0n} \rightarrow E$ が確率 $n\nu \Delta t$ で起こる。

以上より、

$$e(t + \Delta t) = n\nu \Delta t a_{0n}(t) + n\nu \Delta t b_{0n}(t) + (1 - \lambda \Delta t - \mu \Delta t) e(t) \quad \dots\dots (4.8)$$

が得られ、この式を変形して

$$\begin{aligned} (e(t + \Delta t) - e(t)) / \Delta t \\ = n\nu a_{0n}(t) + n\nu b_{0n}(t) - (\lambda + \mu) e(t) \end{aligned} \quad \dots\dots (4.9)$$

が成立し、 $\Delta t \sim 0$ から

$$\begin{aligned} e'(t) &= n\nu a_{0n}(t) + n\nu b_{0n}(t) \\ &\quad - (\lambda + \mu) e(t) \quad \dots\dots (4.10) \end{aligned}$$

が得られる。ここに、 $e'(t)$ は $e(t)$ を t で微分した導関数である。

この手続きを他の状態にも適用すると、

$$\begin{aligned} a'_{01}(t) &= \lambda e(t) + \lambda \sum_{j=1}^n a_{0j}(t) + n\nu \sum_{i=1}^m b_{in}(t) \\ &\quad - (n\nu + \mu + \lambda) a_{01}(t) \quad \dots\dots (4.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a'_{0j}(t) &= n\nu a_{0j-1}(t) - (n\nu + \mu + \lambda) a_{0j}(t) \\ &\quad (2 \leq j \leq n) \quad \dots\dots (4.12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a'_{i1}(t) &= \mu a_{i-11}(t) + \lambda \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) \\ &\quad - (n\nu + \mu + \lambda) a_{i1}(t) \quad (1 \leq i \leq m-1) \\ &\quad \dots\dots (4.13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a'_{ij}(t) &= \mu a_{i-1j}(t) + n\nu a_{ij-1}(t) \\ &\quad - (n\nu + \mu + \lambda) a_{ij}(t) \\ &\quad (1 \leq i \leq m-1, 2 \leq j \leq n) \quad \dots\dots (4.14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a'_{m1}(t) &= \mu a_{m-11}(t) + \lambda \sum_{j=1}^n a_{mj}(t) \\ &\quad - (n\nu + \lambda) a_{m1}(t) \quad \dots\dots (4.15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a'_{mj}(t) &= \mu a_{m-1j}(t) + n\nu a_{mj-1}(t) \\ &\quad - (n\nu + \lambda) a_{mj}(t) \quad (2 \leq j \leq n) \\ &\quad \dots\dots (4.16) \end{aligned}$$

が導かれる。 b_{ij} については(4.11)～(4.16)式で a

と b および λ と μ をすべて交換して同様の式が導かれる。

以上の連立常微分方程式を解くことは非常に困難であり、まず不可能ではないと思われるが、有限マルコフ連鎖の理論を用いると $t \rightarrow \infty$ としたときの定常解のみは求めることが可能となる。すなわち、図-4.3の状態間の推移図はおのおのの矢印にその確率を与えることにより、マルコフ連鎖となるが、有限マルコフ連鎖は必ず定常解を持つことが証明されており、 $t \rightarrow \infty$ とすると $e(t)$ 、 $a_{ij}(t)$ 、 $b_{ij}(t)$ は t に無関係な一定値となりそれらをおのおの、 e 、 a_{ij} 、 b_{ij} とすると、確率であることから

$$e + \sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^m a_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^m b_{ij} = 1 \quad \dots\dots (4.17)$$

が成立し、また、定数の微分は0であることから

$$e'(t) = 0 \quad \dots\dots (4.18)$$

$$a'_{ij}(t) = 0 \quad \dots\dots (4.19)$$

$$b'_{ij}(t) = 0 \quad \dots\dots (4.20)$$

が成立する。

よって、上述の連立微分方程式は $1 + 2n(m+1)$ 元の連立方程式となり、式の変形および大型電子計算機の利用により容易に解が求まる。

このようにして、 λ 、 μ 、 ν 、 n 、 m が与えられるとおのおのの状態確率の定常解として e 、 a_{ij} 、 b_{ij} が求められる。したがって、水路内を(A→B)方向の船舶が航行していてBで*i*隻の(B→A)方向の船舶が待っている確率 p_i は

$$p_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad \dots\dots (4.21)$$

であり、逆にAで*i*隻の船舶が待つ確率 q_i は

$$q_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad \dots\dots (4.22)$$

である。

したがって、A、Bで待っている船舶の平均隻数を、おのおの L_A 、 L_B とすると

$$L_A = \sum_{i=0}^n i q_i \quad \dots\dots (4.23)$$

$$L_B = \sum_{i=0}^m i p_i \quad \dots\dots (4.24)$$

によって平均待ち隻数が与えられる。

平均待ち時間に関しては、この場合にも、Littleの公式

$$W = \lambda L \quad \dots\dots (4.25)$$

の成立が容易に確かめられることから、AおよびBにおける船舶の平均入航待ち時間を、おのおの W_A, W_B とすると、

$$\left. \begin{aligned} W_A &= L_A / \lambda \\ W_B &= L_B / \mu \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.26)$$

より求められる。

図-4.4は、交通量 λ, μ を等しいとし($\lambda = \mu$)、交通量を横軸に隻/時で表し、縦軸に平均入航待ち時間 W を時間で表し($\lambda = \mu$ なので当然 $W_A = W_B = W$ である)、曲線で船舶の平均水路通過時間 $1/\nu$ を分で表した $m = 100, n = 400$ としたときの計算図表である。 $m = 100$ であり、十分大であるから、通過時間は平均 a 分のとき標準偏差が $(a/\sqrt{n}) = (a/20)$ 分である正規分布の場合であると考えてよい(中心極限定理による)。 $m = 100$ に関しては、 p_{100}, q_{100} とも計算機による結果は0なので、実際には $m = \infty$ すなわち待ち数数の制限のない場合の結果として考えられよう。

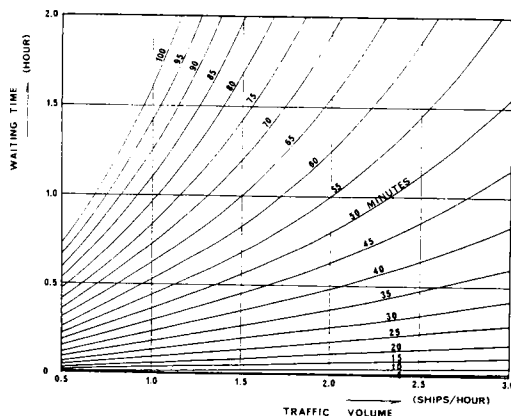


図-4.4 同方向優先入航

図-4.4によると、平均水路通航時間が20分のとき各方向の平均交通量を2隻/時にとると、平均水路進入待ち時間は0.12時間である。同じ条件で4.2.2の一方方向優先入航にかえると、優先方向交通量が2隻/時で、非優先方向船は40分の船舶時間幅を見つけるまで進入待ちをすることから図-4.2より0.73時間待つことがわかる。ただし、この場合は優先船と非優先船全船舶に対する平均待ち時間は、優先船の待ち時間が0であること、および両方向の交通量が等しいことから、

$$0 \times 1/2 + 0.73 \times 1/2 = 0.365 \dots\dots\dots (4.27)$$

であり、水路内進航方向優先入航の約3倍の待ち時間となっている。

なお、4.2.2の最後で述べた必要最小船舶時間間隔は、本項でも無視し、何隻待ていようと平均水路通過時間を $1/\nu$ としているので、実際に交通量が多くなって待ち隻数が増加して k 隻待ちになると、 $1/\nu + (k-1)\Delta T$ (ΔT は必要最小船舶時間間隔)を平均水路通過時間として用いる必要が生ずる。4.2.2および4.2.3において、交通量の少ない場合と限ったのは $(k-1)\Delta T$ が水路通航時間の変動の中に含まれてしまうことが可能となるための制約である。

4.3 交通容量と交通容量等価時間

4.3.1 概説

水路における交通を、4.2では待ち時間で評価したが、その理由は既に述べたように、交通量の少ない場合に限定すると、ひき続いて航行する2船間の最小必要間隔が無視できるからであり、したがって交通容量にはふれなかった。しかし、4.2のように片道通航水路の水路進入を船舶にまかせきりにする方法は、通航量が増加したり、あるいは水路延長が長くなるといった場合には、水路の入口で待機する船舶が飛躍的に増加し、交通容量の面からばかりでなく、安全性の面からも好ましくなく、何らかの対策が要請される。そのような場合に、交通流の円滑化を図る対応策として、水路の一部区間の往復化、中間水域における一時待機、全域往復化、迂回路等の計画を次々に検討する必要に迫られる。

本節では、4.4でこれら水路計画の代替案における交通容量の増減を検討するに先立って、水路計画における交通容量を考察する。

4.3.2 片道通航水路における交通容量等価時間の定義

海上交通における交通量の概念は陸上の自動車交通工学と比較すると難しく、単純な隻数では巨大船と小型船の差がでない。陸上の自動車交通における交通容量は自動車台数で与えられ、大型トラックや大型バスが混在する場合には、乗用車換算当量(passenger car equivalent volume)を用いて、例えば、バス1台が乗用車3台分に相当するといった換算を行っている。しかし、海上では、10万t以上におよぶ巨大船と100tにも満たない小型船が同一の水域を航行し、大ききばかりか速力をはじめとして加速や減速や変針といった操船性能も著しく異り、単純に換算隻数を設けても陸上交通における換算当量と比べると感覚的に納得し難い。

海上交通においては、 L を船の全長とすると、操船の難度は L^2 に、エネルギー的には L^3 に比例するといわれ

ている。また、海上交通は面交通であることから、通航するおのおのの船舶の周囲には他船の侵入を拒む閉塞領域 (ship domain) と呼ばれる領域が存在し、その大きさは、多くの観測結果から船首方向 aL 、横方向 bL (a, b は定数) の長円であると報告されている。したがって、閉塞領域が L^2 に比例することから換算当量として L^2 換算を用いることが多い。さらに、精密な解析を行って α を求めて L^α 換算値を利用したり、また目的によっては L 換算値を利用する場合もあり、これらの換算によって結果は大幅に異なり、船舶の速力差や操船性能の差までを考慮すると、計画の目的に応じて実用にかなった交通容量を定義しなければならないというのが現状である。

そこで、本章においては、片道通航水路の特性を生かして、交通容量を、実隻数や換算隻数で与えずに、水路進入が可能である継続した時間幅で定義することとする。すなわち、その時間幅の長さをもって交通容量と等価な量とし、以下、この量を水路の交通容量等価時間と呼ぶ。

具体的には、水路の容量が、例えば、交通容量等価時間で2時間と与えられる。それを実際の交通量に換算するには、対象船舶が最小必要船間時間20分の大型船ばかりのときは、与えられた交通容量等価時間2時間を、大型船の必要最小船間時間20分で除して、 $2 \times 60 / 20 = 6$ 隻と求まる。

一般に、大小船舶が混在している場合には、この水路を利用する船舶の船型の分布と船型に応じた最小必要船間時間から、おのおのの船舶に必要な最小船間時間の隻数荷重つき平均値を求め、交通容量等価時間をその値で除せば平均的隻数が求まり、若干の操作を施しておのおのの船舶の実隻数に変換されて、実際の交通容量が求められる。例えば、上の大型船に加えて、最小必要船間時間が10分の中型船と5分の小型船が混在する水路で、大型・中型・小型船舶の隻数比が、1:3:2であるときは、

$$\begin{aligned} & 2 \times 60 / ((1 \times 20 + 3 \times 10 + 2 \times 5) / (1 + 3 + 2)) \\ & = 12 \quad \dots\dots\dots (4.28) \end{aligned}$$

により、この水路の交通容量が12隻と求められる。

以上の操作によって、大小船舶の混在する海上交通における容量決定の困難さは、容量を求める時点ではなく、個々の計画がたてられて船種船型分布が具体的に決った時点に移行させることが可能となり、一般的に水路交通計画案の各代替案の比較検討の時点では、個々の船舶に関する情報を必要としなくなったことから、作業が著しく容易となった。複雑きわまる速力差の問題にしても、その時間幅の中で個々の検討を別に行えばよい。

実際に、水路計画を策定するには、通過船舶に関する情報、水路に関する経済・社会条件および自然条件をも考慮せねばならず、当然それらは個々の水路ごとに異なることから、可能な限り交通容量とは分離して検討することが賢明であり、本章は、その線に沿って展開する。

4.4 大交通量モデル (交通容量に関する解析)

4.4.1 概説

本節では、片道通航水路の交通容量を、与えられた交通方式ごとに、幾何学的モデルを用いて4.3で定義した交通容量等価時間の型で求める。片道通航水路は、水路の距離を縦軸に、経過時間を横軸にとって、図の上方を北とし、下方を南として、図-4.5~図-4.10のように表す。水路の区間は、 $(0, D)$ とし、途中の地点を $D_1, D_2, D_3 \dots$ 等で表す。

交通容量等価時間は、4.2で定義したように水路利用可能時間幅であるが、水路利用可能時刻は水路入口からの距離に応じて刻々と変り、したがって、水路利用可能時間幅は時刻の経過とともに、水路の各地点を移動していく。北航のこの速力を v_n 、南航の速力を v_s で表す。また、ここで述べる通航方式は、北航、南航が交互に水路を利用する方式であることから、同じ状態が出現するまでの必要時間をコントロールの周期と呼んで、記号 C で表す。

求めようとする交通容量と同値である交通容量等価時間は、北航・南航で異ってもかまわないが、一般的には両者は行きと帰りの関係にあることから等しいとして、 T と記す。北航と南航の平均交通量が等しくない場合には、例えば、北航 T に対して南航を αT として4.4.2以下で述べる方法を用いることができるから差支えない。また、一周期の内でも、比率 α が時刻 t とともに変る場合、すなわち、 α が α_t の型で与えられても α_t が既知ならば、以下の方法が適用可能である。

以下、4.2から4.6で各種交通方式における最大交通容量を、交通容量等価時間のかたちで求める。

4.4.2 交互交通方式

片道通航水路における通航方法の内、4.2では船にまかせて外部からは何もコントロールしない場合をとり扱ったが、ここでは、片道通航水路を二つの方向が同一の一定時間 T だけ利用し、それらがある周期 C で繰り返される場合を考察する。この場合は、横軸に時間、縦軸に距離をとると、水路利用可能時間幅の移動は図-4.5で示されるパターンをとり、

$$T \leq (C - D(1/v_n + 1/v_s)) / 2 \quad \dots\dots (4.29)$$

が成立し、したがって、 T_{\max} は上式の等号成立のとき

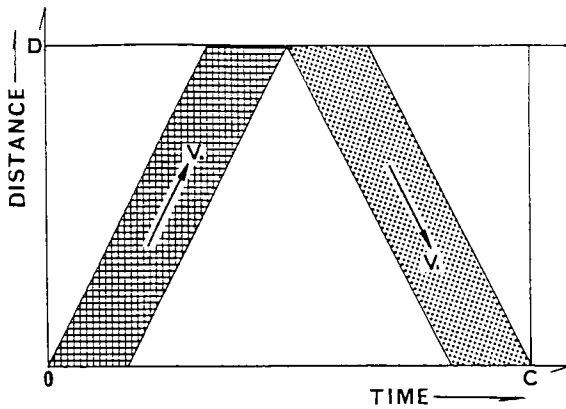


図-4.5 交互交通方式

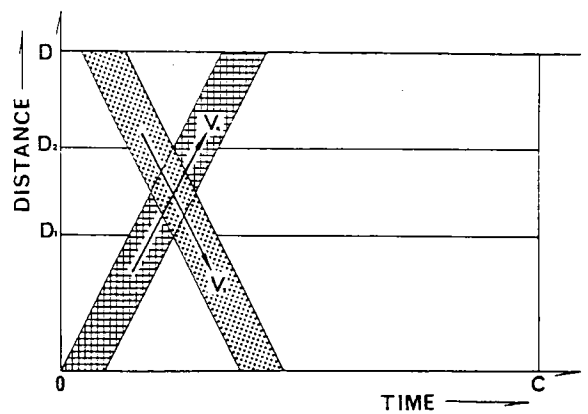


図-4.6 中間すれちがい方式

で右辺の値である。

上式の求め方は、4.4.6で図-4.8の場合を例にとり、図-4.10を用いて、説明するが、他の場合も同じ方法で座標を利用して容易に求められる。

この式は、1周期当たりの最大交通容量であるから、単位時間当たりの最大交通容量は周期Cで除して、

$$T_{\max} = (1 - (1/v_n + 1/v_s) D/C) / 2 \quad \dots\dots\dots (4.30)$$

が得られる。

この式から、周期Cを大にすると交通容量は増加し、また v_n 、 v_s を大にするとすなわち、スピードを上げると容量は大になり、当然のことながら水路延長Dが長くなると容量は小さくなることが確かめられる。とくに、

$$C \leq D(1/v_n + 1/v_s) \quad \dots\dots\dots (4.31)$$

となると交通容量は0となり、通航不能に陥る。

待ち時間と具体的数値を代入した他案との比較は後に扱う。

4.4.3 中間すれちがい方式

この方式は、4.4.2で交通容量が頭打ちになった場合に、それを打開して容量増加を図るために、水路の途中の区間 (D_1 , D_2) を往復水路として、その区間でおおのの方向の船舶がすれ違う方法で、観光地の登山電車に見られる方式である。

この場合は、図-4.6に示される。4.4.1で述べた理由によって D_1 上で両方向の時間幅 T が等しいとおくこ

とにより、

$$T = D_2/v_n - (D_1 - D_2)/v_s - (D_1/v_n + T) \quad \dots\dots\dots (4.32)$$

が成立し、変形して

$$T = (D_2 - D_1)(1/v_n + 1/v_s) / 2 \quad \dots\dots (4.33)$$

が1周期の交通容量として得られる。

このとき、周期Cは

$D - D_1 \geq D_2$ のとき

$$C \geq (D - D_1)(1/v_n + 1/v_s) \quad \dots\dots (4.34)$$

$D - D_1 < D_2$ のとき

$$C \geq D_2 - (1/v_n + 1/v_s) \quad \dots\dots\dots (4.35)$$

を満たさねばならず、どちらか一方で等式を満たさない場合には T は小さくなる。Cが、不等式を満たさないと、 $T = 0$ となる。

単位時間当たりの交通容量は、 T をCで除して

$$T_{\max} = (D_2 - D_1)(1/v_n + 1/v_s) / 2C \quad \dots\dots\dots (4.36)$$

であり、往復区間の長さ $D_2 - D_1$ が長いほど容量は大になり、速力が速いほど容量は増加するが、周期Cは短いほど単位時間にならした容量は増大する。しかし、Cは式(4.34)、(4.35)に示す条件があってある値以上は小さくとれないから、上の不等式の等号成立のときに容

量は最大となる。

以上より、複線区間 $D_2 - D_1$ を一定値としてその始点 D_1 終点 D_2 を決定するには、水路の中央にもっていくことが交通容量の点からは望ましいことが容易に導かれる。

また、往復区間を水路の中間にとらずに端に設けて、すなわち、 $D_2 = D$ とし、周期 C を上の不等式で等号成立のときの値にとると 4.4.2 の結果と一致する。

4.4.4 中間待機方式

水路の中間部に往復水路を設けて、そこで両方向の船舶をすれちがわせる 4.4.3 の方法では、最大交通容量 T_{\max} を与える周期 C は水路の長さに依存することから端数を生じ、実用的ではない。また、容量増に関しても後に考察するように大幅な増加は望めない。そこで、往復部分を改良して往復部に待機機能をもたせて、容量増を図る方式が考えられる。

この場合、すれちがいおよび待機の場所は 4.4.3 と同様に (D_1, D_2) の区間とする。すれちがいや待機方法

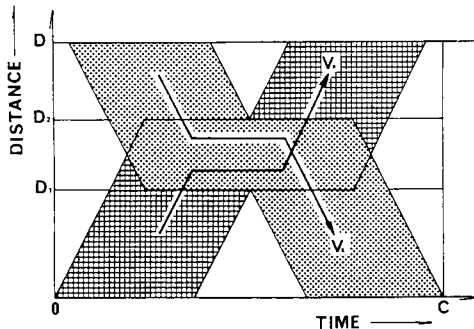


図-4.7 中間待機方式(その1)

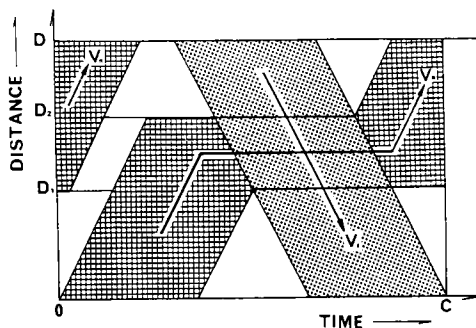


図-4.8 中間待機方式(その2)

はさまざまな型が考えられ、図-4.7は両方向が共に相手側の船舶が一方交通水路を通過完了するまで待機している型であり、図-4.8は南航船は直進するのみで待機せず、北航船のみが往復部で待機し、南航船が (D_2, D) 間を通航し終ってはじめて待機解除となり航行開始する型である。

この場合の容量 T_{\max} の求め方は、4.4.6 で述べるが、図-4.7、図-4.8のパターンはともに等しい T_{\max} を有する。すなわち、

$$T \leq (C - D'(1/v_n + 1/v_s))/2 \quad \dots (4.37)$$

が導びかれ、 T_{\max} は等号成立のときで、右辺の値を C で除した値である。ここで、 D' は D_1 と $D - D_2$ の大なる方である。

式(4.37)において、 D' の係数は負であるから D' が小さいほど T は大きくなり、したがって、4.4.3 と同様に往復部が長いほど、容量が大きくなることがわかる。また、式(4.37)は、往復部が中央に位置するほど、また、速力が速いほど、交通容量が大になることも示している。

4.4.5 一方向二待機方式(スエズ運河現状航行パターン)

これは、図-4.9に示されるように、待機場所を (D_1, D_2) のほかに (D_3, D_4) にも設ける場合で、南航船はノンストップで水路を通過し、北航船は2船団に分けて水路進入し、第1船団は途中 (D_3, D_4) で待機し、第2船団は途中 (D_1, D_2) で待機する方法であり、南北を逆にすると現状のスエズ運河の航行方式である。

この場合の最大交通容量 T_{\max} は、北航第1船団の時間幅を T_1 、第2船団の時間幅を T_2 として、 $T_1 + T_2 = T$ の下で T の関係式を求めると

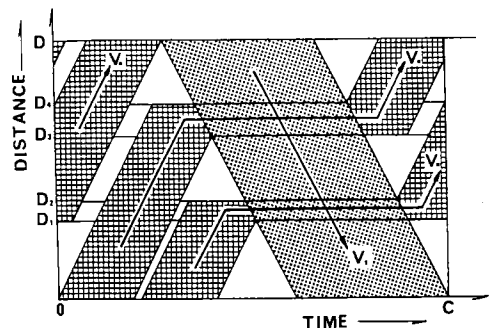


図-4.9 一方向二待機方向(スエズ運河)

$$T \leq (2C - (D + D_3 - D_2) \times (1/v_n + 1/v_s)) / 3 \quad \dots\dots\dots (4.38)$$

または

$$T \leq (C - D_1 (1/v_n + 1/v_s)) / 2 \quad \dots (4.39)$$

が成立し、したがって T_{\max} は、上式の右辺の値の小さな方を C で除した値である。

4.4.6 T_{\max} の決定法

T_{\max} の結果のみを示してきたが、4.4.4 の場合を例にとって容量 T_{\max} を決定する方法を、図-4.10 を用いて説明する。

図-4.10 において

- C : 周期
- v_n : 北航船の通航可能時間の速力
- v_s : 南航船の通航可能時間の速力
- D_1 : 中間にある往復部分の開始点
- D_2 : 中間にある往復部分の開始点
- D_3 : 水路総延長 D

が既知で与えられており、求める最大容量、 T_{\max} (最大交通容量等価時間) は南北航ともに等しいとする。

このとき、水路の南端を 0 (図-4.10 の A 点) として、座標軸を横軸に x 、縦軸に y ときめて、次の順で各点の座標値および直線の式を求めていく。

- (1) A : (0, 0)
- (2) B : (T, 0), AB は交通容量であり、 T とおく
- (3) BC : $y = v_n (x - T)$, 点 B (T, 0) を通り勾配 v_n の直線
- (4) C : ($D_1/v_n + T$, D_1)
 $y = y_1$ と直線 BC : $y = v_n (x - T)$ の交

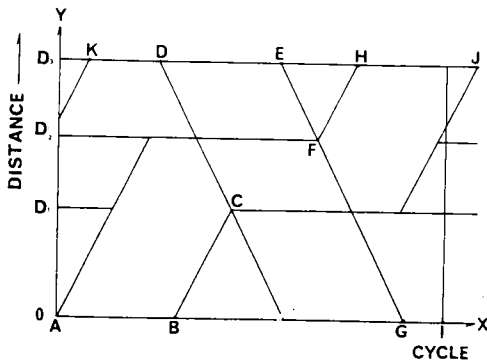


図-4.10 T_{\max} の決定法

点

- (5) CD : $y - D_1 = -v_s (x - (D_1/v_n + T))$
- (6) D : ($T - D_3/v_s + D_1 (1/v_n + 1/v_s)$, D_3)
- (7) E : ($2T - D_3/v_s + D_1 (1/v_n + 1/v_s)$, D_3)
- (8) EG : $y - D_3 = -v_s (x - (2T - D_3/v_s + D_1 (1/v_n + 1/v_s)))$
- (9) F : ($2T - D_2/v_s + D_1 (1/v_n + 1/v_s)$, D_2)
- (10) G : ($2T + D_1 (1/v_n + 1/v_s)$, 0)
- (11) FH : $y - D_2 = v_n (x - (2T - D_2/v_s + D_1 (1/v_n + 1/v_s)))$
- (12) H : ($(D_3 - D_2)/v_n + 2T - D_2/v_s + D_1 (1/v_n + 1/v_s)$, D_3)
- (13) J : ($3T + D_3/v_n - (D_2 - D_1) (1/v_s + 1/v_n)$, D_3)
- (14) I : (C, 0), I 点は 1 周期過ぎた点
- (15) K : ($3T + D_3/v_n - (D_2 - D_1) (1/v_n + 1/v_s) - C$, D_3),

K 点は J 点の 1 周期前の点となる。

周期 C でこれらが反復してあらわれることから、G と I の関係と J の 1 周期前の点 K と点 D の関係から

$$2T + D_1 (1/v_n + 1/v_s) \leq C \quad \dots\dots\dots (4.40)$$

$$3T + D_3/v_n - (D_2 - D_1) (1/v_n + 1/v_s) - C \leq T - D_3/v_s + D_1 (1/v_n + 1/v_s) \quad \dots\dots\dots (4.41)$$

が得られる。これを整理すると

$$T \leq 1/2 (C - D_1 (1/v_n + 1/v_s)) \quad \dots (4.42)$$

$$T \leq 1/2 (C - (D_3 - D_2) (1/v_n + 1/v_s)) \quad \dots\dots\dots (4.43)$$

となり、 D_1 と $D_3 - D_2 = D - D_2$ の大なる方を D' とすると

$$T \leq (C - D' (1/v_n + 1/v_s)) / 2 \quad \dots (4.44)$$

が成立せねばならない。

この結果より、最大交通容量は上の不等式で等号が成立するときであり、複線区間の長さ $D_2 - D_1$ を一定にした場合には、二地点 D_1 、 D_2 を水路中央部に対称に設けたときに交通容量が最大となる点は、4.4.3 と同様である。

以上、図-4.7 の型について最大容量を求めたが、図-4.8 の型でも上で述べた方法で最大容量を求めると図の型の最大値と等しく

$$T = C - D' (1/v_n + 1/v_s) / 2 \quad \dots\dots\dots (4.45)$$

となることが容易に示される。

したがって、図-4.7と図-4.8の違いは船舶の水路通航総時間が北航と南航で異なるだけであるといえよう。

4.4.7 各代替案における容量の増減

ここでは、4.4.2から4.4.5に述べた方式による水路容量等価時間（容量）の増減を、実際の片道通航水路であるスエズ運河に適用する。スエズ運河は、図-4.11にみられるようにポートサイド、スエズ間の全長が162.4 kmあり、地中海とインド洋を結ぶ世界でも代表的な片道通航水路である。



図-4.11 スエズ運河

片道通航水路としてスエズ運河をみると、既に触れたように図-4.9の航行形式をとっており、地形的には地中海側のポートサイドを0 km地点として16 km地点まではポートサイドバイパス（P.B.）が完成しており、往復交通が可能である。

そこから、51 km地点までが片道通航水路であり、51 kmから61 kmまでの10 kmの区間がバラバイパス（B.B.）で往復水路であり、現在は南航の第2船団が北航船団の通過を待つ待機水路として機能している。

61 km地点から95 km地点までが、再び、片道通航水路である。

95 km地点から122 km地点までがビター湖であり、この区間は往復交通が可能であるばかりでなく、通航とは全く別に待機もできる広大な水域があり、現状では南航第1船団が北航船団をかわす待機場所として利用されている。

122 km地点から紅海側の出口である162.4 km地点のスエズまでが片道通航水路となっているが、この区間は、他の区間と比較すると海底地盤が硬く増深が困難な区間である。

運河内における船舶の航行速力は、遅い船でも約15 km/時であることが現実の観測から得られており、これは南行、北行とも同じである。

以上より、4.4.2の交互通航方式で交通容量を求めてみる。 $D = 162.4$ kmとしてすべてのバイパスはないものとする $C = 24$ として式(4.27)を用いて、

$$T = (24 - 162.4 \times 2/15) / 2 = 1.173 \dots (4.46)$$

時間である。

これをビター湖ですれちがわせることにして4.4.3の中間すれちがひ方式で計算すると、 $D = 162.4$ 、 $D_1 = 95$ 、 $D_2 = 122$ として式により、

$$T = (122 - 95) \times (2/15) / 2 = 1.8 \dots (4.47)$$

時間であり、この場合は周期 C を $C = 122 \times (2/15) = 16.26$ 時間とるのが容量の上からは最も理想的であるから、一日あたりの交通容量は、

$$T = 1.8 \times 24 / 16.26 = 2.66 \dots (4.48)$$

時間と増加するが、周期が16.26時間と端数であるから、現実的には不便である。

交互通航方式、中間すれちがひ方式は、スエズ運河の現状とはかけ離れており、計算例および他の方式との比較の対象として試算した。

4.4.4および4.4.5の通航方式は、現実性を帯びてくるので、16 kmまで往復水路であるポートサイドバイパスを考慮して、基点を16 km地点へ移し、したがってバラバイパスの始点、終点およびビター湖の始点、終点、および出口のスエズ地点の位置51, 61, 95, 122, 162.4 kmは、おのおの16 kmを減じて35, 45, 79, 106, 146.4 km地点とする。

まず、現状の方式で $D_1 = 35$ 、 $D_2 = 45$ 、 $D_3 = 79$ 、 $D_4 = 146.4$ 、 $C = 24$ として T を求めると、式(4.38)より

$$T = (2 \times 24 - (146.4 + 79 - 45) \times 2/15) / 3 = 7.98 \dots (4.49)$$

となる。南航は2つにわかれるが、それらを T_1 および T_2 とすると4.4.6の計算を行って、 $T_1 = 5.484$ 、 $T_2 = 2.498$ と求まる。

ここで、バラバイパスの貢献度をみるために4.4.4の方式でバラバイパスの部分を片道通航水路とみなして、往復部はビター湖のみとして計算する。この場合には、 $D_1 = 79$ 、 $D_2 = 106$ 、 $D = 146.4$ として式(4.37)に代入して、

$$T = (24 - 79 \times 2/15) / 2 = 6.73 \dots (4.50)$$

時間となり、 $7.98 - 6.73 = 1.25$ 時間貢献している。

現在、スエズ運河の拡張が検討されているが、さらに61 km地点と95 km地点の片道水路を拡幅して、中間すれちがひ方式を適用すると、式(4.37)に $D_1 = 35$ 、 $D_2 = 106$ 、 $D = 146.4$ を代入して、

$$T = 1/2(24 - 40.4 \times (2/15)) / 2 = 9.306$$

…………… (4.51)

時間に増え、現状の約 1.17 倍となる。

さらに、16 km 地点と 51 km とを往復化すると、 $D = 40.4$ として 4.4.2 の交互すれちがい航行方式の適用となるから、式 (4.27) より、9.306 時間となり上で述べた容量とかわからないことがわかる。したがって、この拡張事業は、安全性の向上や操船の容易さ等、他の要素の利点は考えられるが、交通容量の増加には効果はないことがわかる。全区間を複線化すると当然のことながら $T = 24$ と一挙に上の値の 2.6 倍近くに増え、現状の容量と比較しても $24/7.98 \sim 3$ だから、3 倍の交通容量になることがわかる。

4.5 大交通量モデル（待ちに関する解析）

4.5.1 概説

前節において、方向別の進入可能時間帯を設けて与えられた制限のもとでその時間幅の最大化を試みたが、待ちについては触れなかったので本節で扱う。

片道通航水路における待ちの問題を考察するにあたっては、2 種類の異なった型の待ちがある。第 1 種の待ちは、通航方式に起因するもので、その方式を採用する限り不可避な進入可能となるまでの待機のための待ち時間であり、簡単な算術で容易に求められる。第 2 種の待ちは、到着した船舶が多すぎて、ある周期をもって進入可能となる時間帯には進入しきれずに、次の周期まで待たされるという場合の待ちで、片道通航水路の固定した容量と変動する通航量との関係から生ずる待ちである。

本章では、第 2 種の待ちを求める。

4.5.2 片道通航水路の待ち合わせモデル

待ち合わせ理論は、交通容量が有限な場所に交通量の負荷をかけたときに、その場所での混雑に関する情報をあらかじめ知るために利用される。一般の待ち合わせ理論によると、平均交通量が交通容量に達するまではその系は待ちが無制限に増加する現象は決して起こらないが、交通容量に近づくにつれて破局には至らないものの渋滞がひどくなり、現実的にはその系は機能を失うことが知られている。したがって、4.4 で交通容量は各交通方式に対して求められたが、平均交通量が交通容量を上まわらないというだけで現実の交通量をスムーズにさばけるか否かは全く別の問題で、検討を行う必要がある。そのために、以下の待ち合わせモデルを開発した。

まず、与えられた片道通航水路は 4.4 で述べた各案の通航形式をとることとする。したがって、容量制限による待ちを考察しようとする場合は、片道であるとか水路

であるとかの問題ではなく、ある周期をもって利用可能時間と利用不可能時間とが交互に生ずる窓口が一つあって、そこに 1 人あたりのサービス時間が異なる客が到着してサービスを受けて立ち去るという型の待ち合わせのシステムの輻輳問題となる。したがって、両方向を同時に考察する必要はなく、一方向のみのモデルを作成し、それをおのおのの方向に適用すればよい。

以上により次のような待ち合わせモデルを作成する。

- i) 片道通航水路は、周期 C をもって T 時間だけ進入可能な時間帯があり、その時間帯にのみ船舶は水路へ進入可能である。
- ii) 進入可能な時間帯に進入しようとする船舶は、遅くとも進入可能な時間帯の以前の時刻に到着していなければならないとし、進入可能な時間帯内に到着した船はその時間帯には進入できないこととする。
- iii) 到着する船舶はランダム到着とする。
- iv) 到着する船舶は、船間間隔をとって水路内を航行する。船間間隔は、距離間隔ではなく、時間隔で表されており、ある確率分布に従うものとする。

上で述べた i) ~ iv) のうち ii) は理論上の取扱いが容易になるので付加した。

ii) の制限がないとき、すなわち、水路進入不可能時に到着した待機中の船舶が、水路進入可能となって次々に水路へ進航しているときに新たに到着した船舶が、最後尾につけて水路進入可能とする場合は、待ち時間がこのモデルより少なくなるから、このモデルで検証した待ちに関する情報は、待ちをより安全側にたって評価することになる。iii) と iv) を数学的に表現すると、水路への船舶の到着分布はランダムであることから、単位時間あたりの到着数はポアソン分布であり、その平均値を λ としさらに t 時間の幅に到着する船舶の隻数を N_t ($N_t = 0, 1, 2, \dots$) とすると、 N_t が k 隻である確率 $P_r\{N_t = k\}$ は

$$P_r\{N_t = k\} = e^{-\lambda t} (\lambda t)^k / k! \dots\dots (4.52)$$

である。

したがって、 N_t の母関数 $\sum_{k=0}^{\infty} P_r\{N_t = k\} \cdot x^k$ は

$$\sum_{k=0}^{\infty} P_r\{N_t = k\} \cdot x^k = e^{-\lambda t(1-x)} \dots\dots (4.53)$$

であり、分散 $V(N_t)$ は λt である。

次に、おのおのの船が水路を通航する際の必要最小船間距離を X とし、 X を 1 分ごとに区切って ($X = 0, 1, 2, 3, \dots$)、 X が i 分である確率 $P_r\{X = i\}$ を

$$P_r\{X = i\} = p_i \dots\dots\dots (4.54)$$

とすると、母函数 $P(x)$ は

$$P(x) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i \{X=i\} x^i = \sum_{i=0}^{\infty} p_i x^i \quad \dots\dots\dots (4.55)$$

さらに、 X の平均値を $E(X)$ 、分散を $V(X)$ と表すこととする。

さて、一般の待ち合わせ理論では、到着する人数や船の隻数が重要であるが、この場合には到着する船舶が水路内を航行する際に必要とする船間時間が問題となる。すなわち、必要船間時間が5分の船舶4隻の到着と必要船間時間が20分の船舶1隻の到着が等しくみなされる。なぜならば、どちらも水路を20分間占有するからである。

したがって、到着数を考察するには、水路へ到着する船舶の必要船間時間が必要であり、時間幅 t にどれだけの船間時間間隔が入ってくるかを求めねばならない。

この量を求めるためには、各船舶は単位時間あたり、平均 λ のポアソン分布で到着し、到着したおのおのの船舶は、到着時間隔と独立な、船種・船型・船速に応じた必要船間時間分布 $\{p_i\}$ に従う船間時間を必要とすることから、時間幅 t に到着する船舶の必要船間時間の総和は複合ポアソン分布となり、その母函数は

$$e^{-\lambda t + \lambda t P(x)} \quad \dots\dots\dots (4.56)$$

で与えられる。

すなわち、 t 時間幅に N_t 隻の船舶が到着するとき、 i 番目の船舶の必要船間距離を X_i とし、おのおのの X_i の確率分布を上 $\{p_i\}$ とすると、 t 時間幅に N_t 隻の船舶が必要とする総必要船間時間 $\sum_{i=1}^{N_t} X_i$ の確率分布 $\{q_k\}$ は(4.56)式を x の冪級数で表した時の x^k の係数で与えられる。この分布の平均値 m は

$$m = \lambda t \cdot E(X) \quad \dots\dots\dots (4.57)$$

で、分散 σ^2 は

$$\sigma^2 = \lambda t \cdot (E(X))^2 + \lambda t \cdot V(X) \quad \dots (4.58)$$

で与えられる。

具体的に q_k の値を求めるには、式(4.56)の x^k の係数であるから、 $e^{\lambda t P(x)}$ の展開式の x^k の係数に $e^{-\lambda t}$ を乗ずればよいことから

$$A(x) = e^{B(x)} \quad \dots\dots\dots (4.59)$$

$$B(x) = \lambda t P(x) \quad \dots\dots\dots (4.60)$$

とにおいて、 $A(x)$ の x^k の係数を求めればよい。

一般的に函数 $f(x)$ の x^k の係数は $f^{(k)}(0)/k!$ で与えられる。

式(4.59)を x について n 回微分すると

$$A^n(x) = \sum_{r=0}^{n-1} C_r \cdot B^{r+1}(x) \cdot A^{(n-(r+1))}(x) \quad \dots\dots\dots (4.61)$$

が成立し、

$$B(x) = \lambda t P(x) = \lambda t (p_1 x + p_2 x^2 + p_3 x^3 + \dots + p_k x^k \dots) \quad \dots\dots\dots (4.62)$$

より

$$B^k(0) = (k-1) i \cdot \lambda t \cdot p_k \quad \dots\dots\dots (4.63)$$

が成立する。

ここで、 $A(0) = 1$ と式(4.61)と式(4.63)を用いると、次々に $A^k(0)$ が求まり、結局 $e^{-\lambda t}$ を乗じて式(4.56)の x^k の係数 q_k が求まる。

この手続きは k が大になると電子計算機を用いても誤差が大になるが、 k が大なときに問題となるのは、 T の平均値が大なる場合である。 T の平均値が大なる場合には複合ポアソン分布の正規近似を利用して q_r を以下の方法で求める。ここで、複合ポアソン分布の正規近似とは、複合ポアソン分布の母函数式(4.56)が

$$e^{-\lambda t + \lambda t P(x)} = (e^{-\lambda t/n + \lambda t P(x)/n})^n \dots (4.64)$$

とかき表せることから、母函数が別の複合ポアソン分布の母函数

$$e^{-(\lambda/n)t + (\lambda/n)t P(x)} \quad \dots\dots\dots (4.65)$$

の n 乗になっており、したがって、母函数の性質から、別の複合ポアソン分布に従う n 個の独立な確立変数の和の分布であることが示された。式(4.64)で n は任意に大きな値をとることができるから、いわゆる、無限分割可能な分布である。

無限分割可能な分布は、負の値をとらないことと離散的なことについて検討しさえすれば、中心極限定理により正規分布で近似することができる。

上の複合ポアソン分布については、平均 m で分散 σ^2 の正規分布が負となる確率は、 $m - 3\sigma > 0$ であるならば 0.0015 と非常に小さいから、

$$\lambda t \times E(X) - 3 \times \sqrt{\lambda t \cdot E(X)^2 + \lambda t \cdot V(X)} > 0 \quad \dots\dots\dots (4.66)$$

が成立するような X の場合は、 $\{q_k\}$ は正規分布で近似できる。ここで $\{q_k\}$ の平均値 m は式(4.57)で、分散

σ の 2 乗は式 (4.59) であり, $\{q_k\}$ が離散的な確率分布であることから, q_k は

$$q_k = \int_{k-0.5}^{k+0.5} (1/\sqrt{2\pi}\sigma) e^{-(x-m)^2/2\sigma^2} dx \quad \dots\dots\dots (4.67)$$

で与えられる。

以上により, 任意の時間幅 t に対して, その時間幅内に到着する船舶の必要船間時間の総和が k 分である確率 q_k が求められる。

したがって, 片道通航水路においては, 周期 C をもって, T 時間の進入可能時間が継続することから, 以上述べてきた式の t を C で置きかえれば, 1 周期 C 内に合計 k 分の必要船間時間が到着する確率が与えられる。

一方, サービス側は 1 周期において, T 分だけ処理可能であり, 到着必要船間時間が T より小の場合は (一つ前の周期において待った船がないとすると) それら全船舶はサービスを受けられるが (水路へ進入可能だが), T より大なる量の場合は T に相当する量だけサービスを受けられ, 残りは次の周期でサービスが開始するまで待たねばならない。理論的に厳密に言えば, T とおのおの船舶の必要船間時間の和がぴったり一致しない場合が生じその端数が問題となるが, 実際上は最後の船の必要船間時間によってサービス可能な量は T より大であったり T より小であったりするわけで大勢には影響しない。

ここで, 待ち合わせの問題としてみると, 到着の確率分布が得られ, サービスの方法も一定量のバルクサービスが, 周期的にレギュラーに為されることがわかった。この型の待ち合わせの問題は, 通常のように任意の時刻における待ちの数を論ずる方法では直接に解けずに, 次の様に 2 段階に分けて待ちを解析せねばならない。

まず各周期において, 待ち合わせモデルの条件 ii) で述べた進入可能な時間帯の以前の時刻に到着していなければいけないとしたその時刻において, そのときその周期のサービスを受けられないことが判明し (T よりオーバーして), 次回のサービス開始まで待たねばならない残存量, すなわち, 残った船舶の必要船間時間の総和が, k ($k = 0, 1, 2, \dots$) である状態をすべて考えると, これはマルコフ連鎖となっており, いわゆる隠れマルコフ連鎖である。

したがって, n 回目の周期のサービス可能な制限時間に間に合いながら容量オーバーで待たされる量が k である状態の確率を $r_k(n)$ とすると $r_k(n)$ と $r_k(n-1)$ の間には

$$r(n) = r(n-1) \times Q \quad \dots\dots\dots (4.68)$$

ここで,

$$r(n) = (r_0(n), r_1(n), r_2(n), \dots) \quad \dots\dots\dots (4.69)$$

$$r(n-1) = (r_0(n-1), r_1(n-1), r_2(n-1), \dots) \quad \dots\dots\dots (4.70)$$

$$Q = (Q_{ij}) \quad \dots\dots\dots (4.71)$$

が成立する。

ここに (Q_{ij}) は推移確率行列であり, その要素 Q_{ij} は, 1 周期前の制限時刻において, i 分の船間時間が残存して, その次の周期の制限時刻において j 分の船間時間が残存する確率である。したがって

$$Q_{j0} = \sum_{k=0}^{T-i} q_k \quad (0 \leq i \leq T) \\ = 0 \quad (T < i) \quad \dots\dots\dots (4.72)$$

$$Q_{ij} = q_{T+j-i} \quad (0 \leq i \leq T+j, 1 \leq j) \\ = 0 \quad (T+j < i, 1 \leq j) \quad \dots\dots\dots (4.73)$$

である。ここに q_k は, 式 (4.67) であり, 含まれている m, σ の値を求めるにあたっては, 式 (4.57) と式 (4.58) において t の代りに C とした値である。

以上より初期条件として

$$r_k(0), (k = 0, 1, 2, \dots; \sum r_k(0) = 1)$$

を与えさえすれば, 式 (4.68) により順次 $r_k(1), r_k(2), \dots$ が求まり, したがって

$$\lim_{n \rightarrow \infty} r_k(n) = r_k \quad \dots\dots\dots (4.74)$$

が定まり, 初期条件に関係しない定常状態の待ち量の確率分布が求められる。

この $\{r_k\}$ は, 制限時刻までに到着していながら, その直後の水路利用可能時間帯で水路へ進入できなかった隻数の船間時間換算当量が k である確率である。水路利用可能開始時間から t 時間経過したときにおける待ち量の確率は, さらに, t 時間に到着する当量が i である確率分布 $\{q_i\}$ の重ね合わせの分布として求められる。

具体的には, $t < C$ として ($t = C$ ならば, また $\{r_k\}$ になり, $t > C$ ならば t から $0 < t < C$ となるまで, C を減じる), この $\{r_k\}$ と, 式 (4.67) で計算した $\{q_i\}$ をたたみ込めばよい。

このようにして, 任意の時刻における船間時間の待ち量の状態確率が求まり, これらの値を利用して水路計画

を作成することが可能となる。

4.5.3 数値計算例

ここでは片道通航水路の待ちについて、実際の例を用いて計算してみる。

片道通航水路の例としては 4.4 と同じくスエズ運河をとり、同運河のデータを利用する。まず、1979 年 1 年間のスエズ運河の年間交通量は、表-4.1 である。1 日あたりの交通量に変換すると、北航 28.9 隻/日、南航 26.9 隻/日である。

表-4.1 スエズ運河年間交通量

	To North	To South	Total
Jan.	873	830	1703
Feb.	748	780	1528
Mar.	977	821	1798
Apr.	870	835	1705
May	908	865	1773
June	852	812	1664
July	897	830	1727
Aug.	923	749	1672
Sep.	861	762	1623
Oct.	907	816	1723
Nov.	836	832	1668
Dec.	903	876	1779
Total	10555	9808	20363
Ships/Day	28.92	26.87	55.79

また、到着分布は、数多くの調査から⁴⁾¹⁰⁾ポアソン到着と見なせる。

必要船間時間間隔に関しては、1979 年 8 月の約 2 週間の調査結果は、表-4.2 である。この表で、30 分以上の船間距離であった船舶については、必要船間時間ではなく、何か別の理由によっているとして除いて船間時間分布を作成した。これは文献にもあるように V.L.C.C. の積荷で 24 分、空荷で 17 分という最小船間距離に照らしてみても妥当であるといえよう。この平均値と分散は、表-4.3 から北航で 9.22、34.96 南航で 12.17、26.36 である（30 分以上を除く）。

現状のスエズ運河の最大容量 T は、4.4.5 で求めたように 7.98 時間であるが、航行の方向が北航から南航あるいは南航から北航と逆転するときの安全性を見込んで余裕時間を、0.98 時間とり、7 時間として以後の計算を行った。

$T = 7$ 時間 = 420 分の場合、南航・北航の船間時間分布を表-4.2 とすると、平均的には、北航で最大隻数は 1 日当り $420 / 9.70 = 43.3$ 隻であり、南航では $420 / 12.17 = 34.5$ 隻である。既に述べたように、交通容量と等しい交通量までは通過可能であるが、現実的には交通容量に近づくと待ちが増えて航行不可能となることから、表-4.2 に示される 1979 年交通量の北航 28.9 隻/

表-4.2 船間時間

X	Number of Ships	
	To North	To South
1	0	0
2	3	1
3	5	0
4	13	2
5	55	3
6	57	35
7	43	3
8	40	5
9	27	11
10	47	230
11	25	0
12	13	6
13	14	3
14	11	1
15	11	49
16	12	3
17	6	0
18	7	0
19	6	1
20	4	42
21	2	1
22	3	0
23	4	0
24	1	1
25	3	17
26	1	0
27	1	0
28	4	0
29	1	0
30	0	6
30 <	36	25
Total	455	445

表-4.3 船間時間の統計量

STATISTICS OF X		
	To North	To South
N	419	420
ΣX	3863	5112
ΣX^2	50263	73292
$\bar{X} = \Sigma X / N$	9.22	12.17
$VAR(X) = \Sigma X^2 / N - \bar{X}^2$	34.96	26.36
$\sigma = \sqrt{VAR(X)}$	5.91	5.13

日、南航 26.9 隻/日を勘案して、北航については 1 日平均交通量 $E(N)$ を 28 隻から 40 隻まで 2 隻おきに 6 ケース、南航については 1 日平均交通量 $E(N)$ を 26 隻から 32 隻まで 2 隻おきに 4 ケース、南北航合計 10 ケース

について4.5.2の待ちの計算を行った。

まず、到着する船舶の船間時間間隔 X の分布は表-4.2で与えられ、一方、1周期内で船舶は平均 $E(N)$ のポアソン分布で到着することから、1周期内での必要総船間時間を L とすると L の到着分布は、平均 $E(L)$ および分散 $V(L)$ が

$$E(L) = E(N) \cdot E(X) \quad \dots\dots\dots (4.75)$$

$$V(L) = E(N) \cdot V(X) + V(N) E^2(X) \quad \dots\dots\dots (4.76)$$

の複合ポアソン分布であり、標準偏差は分散の平方根であることから、これらの統計量を10ケースについてまとめると表-4.4となる。

表-4.4 計算ケース

To North						
E(N)	V(N)	E(X)	V(X)	E(L)	V(L)	$\sigma(L)$
28	28	9.70	25.93	271.6	3360.56	57.97
30	30	9.70	25.93	291.0	3600.60	60.00
32	32	9.70	25.93	310.4	3840.64	61.97
34	34	9.70	25.93	329.8	4080.68	63.88
36	36	9.70	25.93	349.2	4320.72	65.73
38	38	9.70	25.93	368.6	4560.76	67.53
40	40	9.70	25.93	388.0	4800.80	69.29

To South						
E(N)	V(N)	E(X)	V(X)	E(L)	V(L)	$\sigma(L)$
26	26	12.17	26.36	316.42	4536.19	67.35
28	28	12.17	26.36	340.76	4885.13	69.89
30	30	12.17	26.36	365.10	5234.07	72.35
32	32	12.17	26.36	389.44	5583.00	74.72

この複合ポアソン分布はいずれも平均値が4倍の標準偏差より大であるから、平均 $E(L)$ 、分散 $V(L)$ の正規分布で近似でき、式(4.67)によって1周期内に到着する総必要船間距離が k 分である確率 q_k が計算され、それを用いて推移確率行列 Q が、式(4.71)～式(4.73)によって定まる。

この推移確立行列 Q を用いて定常状態確率 $\{r_k\}$ が求まり、これは運河へ入河する制限時間内に船舶が到着していながら、そのときに容量オーバーで入河できなかった船舶が、運河内を航行するときの総所要船間時間 W が k 分である確率である。

したがって、その平均値 $E(W)$ 、分散 $V(W)$ 、標準偏差 $\sigma(W)$ は

$$E(W) = \sum_{k=1}^{\infty} k r_k \quad \dots\dots\dots (4.77)$$

$$V(W) = \sum_{k=1}^{\infty} k^2 r_k - E(W)^2 \quad \dots\dots\dots (4.78)$$

$$\sigma(W) = \sqrt{V(W)} \quad \dots\dots\dots (4.79)$$

で得られる。

各ケースごとの状態確率の累積分布すなわち k 分以内の確率

$$\left\{ \sum_{i=1}^k r_i \right\} \quad (k=1, 2, \dots\dots) \quad \dots\dots\dots (4.80)$$

を計算して、 k を時間に直して、図示すると、北航については図-4.12に、南航については図-4.13となる。

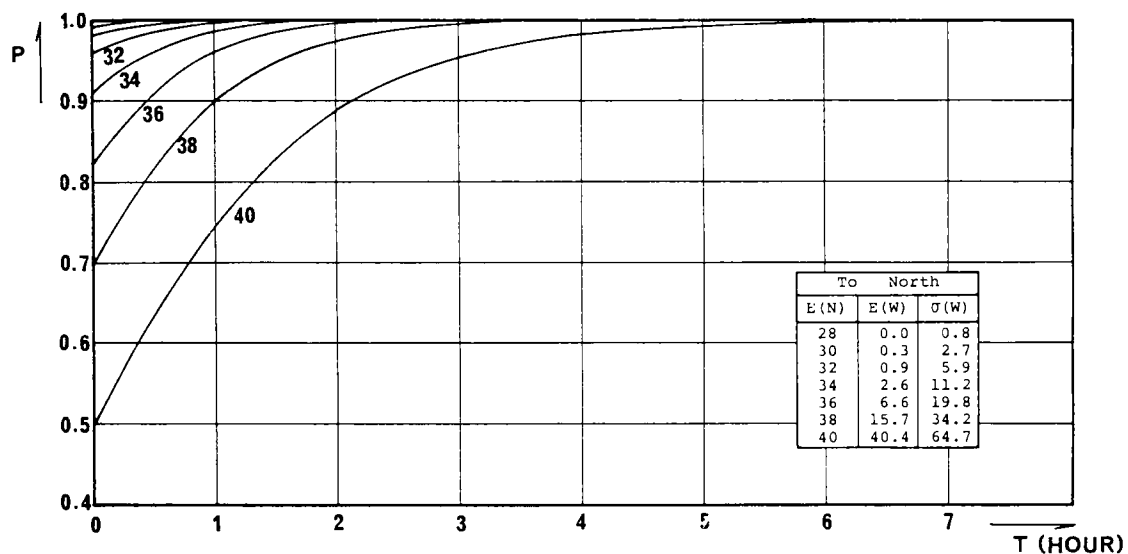
水路の容量は7時間であることから図-4.12、図-4.13より、待たされた船舶は、南航で $E(N)=32$ のケースを除くと、次の周期で運河を通航できることが示されており、南航 $E(N)=32$ のケースでは確率約0.01で翌々日まで待たされることがわかる。 $E(N)$ の値いくらかをもって、拡張計画を行うかは図-4.12、図-4.13より待機泊地の規模、運河入口までの航行条件等の自然条件中、滞船による船舶側の必要経費と混雑によってスエズ運河通航を避けるといった経済的条件、混雑による安全性の条件等によって計画者がその他の特殊事情も勘案して決定すべきことである。

以上で定常解は求まるが、式(4.68)からもわかるように、初期確率 $r_k(0)$ を与えさえすれば、 $r_k(n)$ は次々に求まるので、事故やその他のトラブルで一時的に運河が利用不可能となり、多くの船が待っている状態から、運河利用が再開されて待ち船が次々に運河へ進航していくときの一日ごとの待ち船の総必要船間時間分布(遷移確率分布)が得られる。

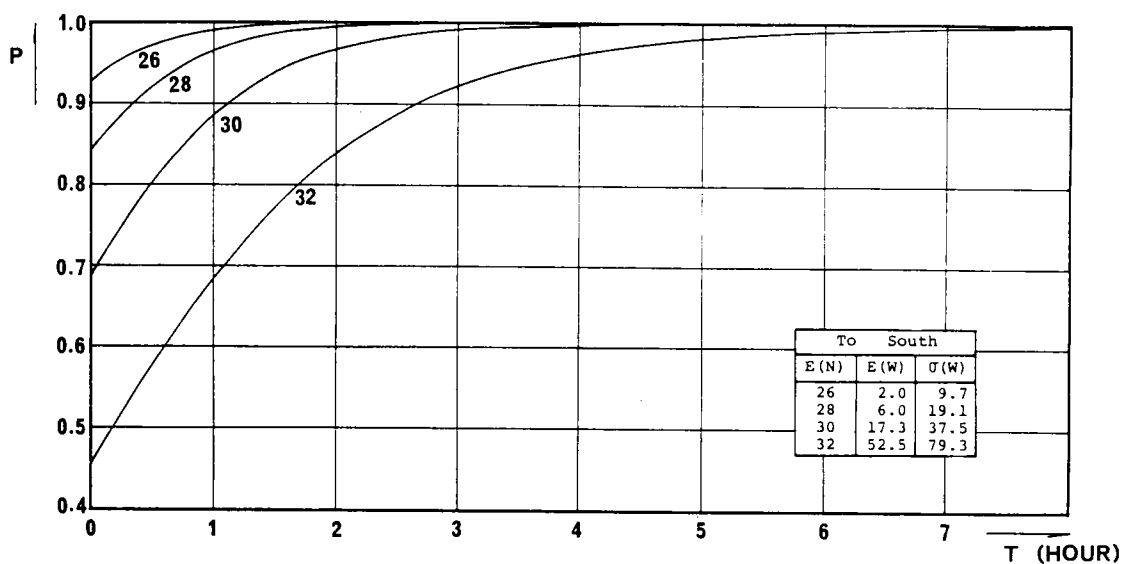
ここでは、その例として南航で $E(N)=28$ 隻のときに初期の待ち船の総必要船間時間を $2 \times T$ すなわち840分としたときの一日ごとの制限時間直後の待ち船の総必要船間時間の累積確率分布を求め、図-4.14に示した。

図によると、13日目に定常解とほぼ重なり、平均すると13日ぐらいで、何か特別な対応策をとらない限りトラブルの影響はなくなると考えてよい。とはいえ、図-4.14より4日後には20%以上の確率で待ちが0になることが示されていることから、5回に1回は、4日後に平常に戻ると考えてよい。

また、この図より平常に戻るのが遅いと思われるときには、その期間については必要船間時間隔を平常より小さくするといった能力を向上させる方策をとって、短縮させることが考えられる。その場合の遷移状態確率も、パラメータ C 、 T 、 v_n 、 v_g 、 $E(X)$ 、 $V(X)$ をかえることによって求められる。



図－4.12 待ちの状態確率分布（北航）



図－4.13 待ちの状態確率分布（南航）

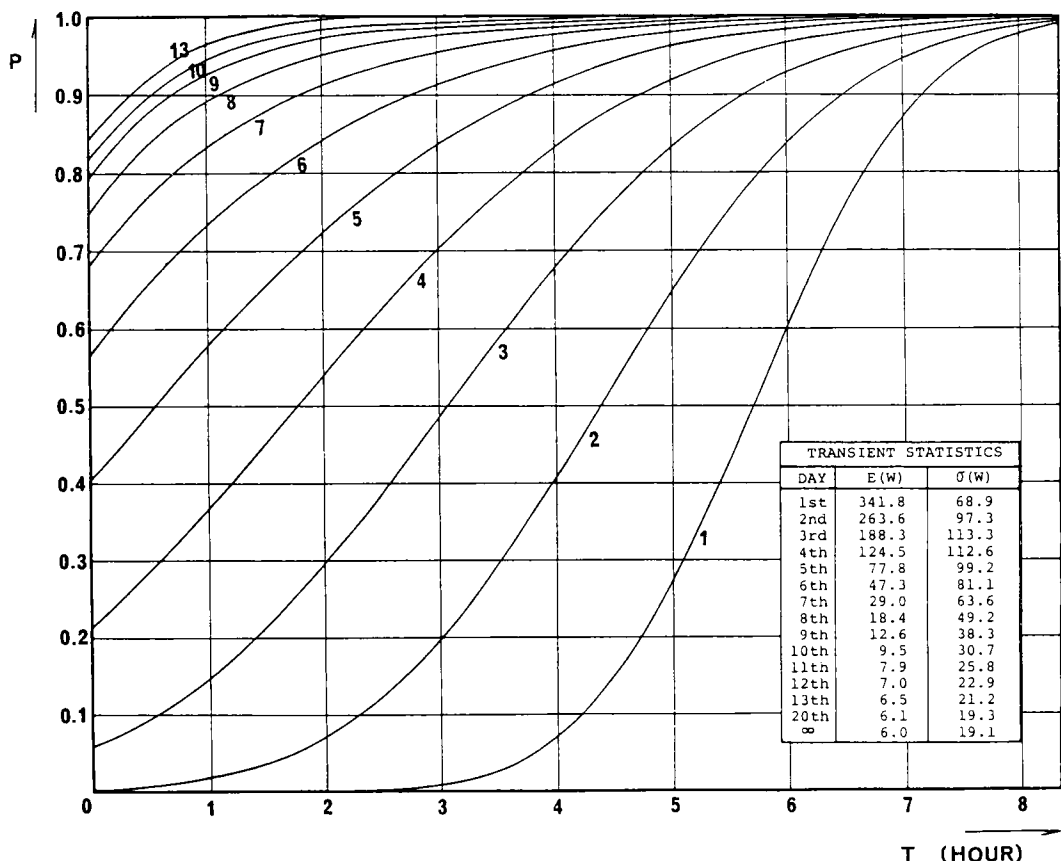


図 - 4.14 待ちの遷移状態確率累積分布

4.6 結言

片道通航水路は、日本のみならず全世界に見られ、往復にこしたことはないのだがさまざまな制約条件から片道として計画せざるを得ないのもまた現実である。

したがって、本章では、片道通航水路の最大容量を、両方向から来る船舶が時間をわけあって利用せざるを得ない事実に着目して水路利用可能最大時間をもって容量と同値の量として交通容量等価時間を導入し、水路ごとに異なる利用船型に関するわずらわしさを一掃し、容量についてはすっきりとまとめられたと思われる。この点をメインテーマとして、交通量が非常に少ない場合の評価を加えてまとめた次第である。

なお、4.2の交通量が少ない場合の評価手法の同方向優先方式は、日本の人工港である新潟東港の計画の際に作成しており、今回図表を作成するために新たに計算を付加した。4.3、4.4は、日本政府が、エジプト国のスエズ運河第2期拡張計画の協力を行ったさいに交通容量

の検討の際に使用した手法であり、4.5は、さらに待ち時間の理論を付加したものである。

以上の内容より結論的に言えることの主要な点は、次のようである。

- (1) 水路の容量といったかたちの容量の場合には、単に量だけでなく、時間も考慮する必要が生じることから、交通容量等価時間の概念は、非常に有効に働くことがわかった。これによって片道通航水路の容量問題に関しては比較的一般的に論ぜられるようになったのではないと思われる。今後は、片道通航水路でなく併航や追越しさらに交差をも含む一般水域へ、水域ごとに対象船型の異なるという困難を克服して、誰もが納得する容量の概念（現在の L^2 あるいは一般的に L 換算容量ではまだ不満が多い）を見つけ出すことが望ましい。
- (2) 交通量が少ないときの待ちに関する計画情報が得られた。

- (3) 片道通航水路の容量が、水路の諸条件により求める計算式が開発された。
- (4) 交通容量問題からスエズ運河の拡張計画をみると、全区間を拡張し往復通航水路にした場合、交通容量は現状の3倍まで増加することが(3)により計算される。

参 考 文 献

- 1) W. Feller : An Introduction to Probability Theory and Its Applications, Volume 1, Volume 2, John Wiley & Sons, Inc., 1950, 1965.
- 2) T.F.D. Sewell : Factors Involved in Developing the Suez Canal, BULLETIN OF PIANC, No. 28, 1977, Volume 3, pp. 3 ~ 20.
- 3) J.D. Griffiths and E.M. Hassan : Shipping Operations in the Suez Canal, Symposium on Mathematical Aspects of Marine Traffic, London, 1977.
- 4) S.M.I. Mansour : Queueing & Traffic Simulation in the Suez Canal, Cairo University, 1978.
- 5) Suez Canal Authority, Yearly Report, 1979.
- 6) Suez Canal Authority, Monthly Report, Jan. ~ Dec., 1979.
- 7) Highway Capacity Manual 1965, Highway Research Board Special Report 87, 1965.
- 8) Y. Okuyama, Y. Hisada : Traffic Capacity and Vessel Congestion in One-Way Channels, 25 th, Permanent International Association of Navigation Congress, (PIANC), Edinburgh, 1981, pp. 297 ~ 312.
- 9) 佐佐木 綱 : 交通流理論, 交通工学シリーズ 3, 技術書院, 1965年.
- 10) スエズ運河第2期拡張計画調査報告書, 国際協力事業団, 1980年.

5. 海上交通シミュレーション

5.1 緒言

電子計算機の飛躍的な発展と普及に伴い、シミュレーションという術語も電子計算機特有のわかりづらい横文字から脱皮して、いまでは新聞雑誌紙上でも特に説明を付けずに扱われることも多くなってきた。

これはシミュレーション手法が現実と直面する問題を解くのに非常に有効であることから、数多くのシミュレーションが学問の分野からの要請よりも、むしろ社会生活全般からの要請に応じて開発されてきたからにはほかならないからであるといえよう。海上交通工学の分野でも例外でなく、¹⁾²⁾³⁾数多くのシミュレーションが開発され利用されている。

ここで改めて説明するまでもないが、シミュレーションとは“真似する”の意味のシミュレートの名詞であって“真似”という意味の英語である。よく「他人の思っていることは、その人の顔つきを真似してそのとき自分の心にうかぶことから推量できる」といわれるが、自然科学・社会科学を問わず科学の分野である現象を解明するにあたって、その現象の真似をすることによって解明しようとする方法がシミュレーション手法である。

シミュレーションの考え方そのものは古くからあったようであるが、近代シミュレーション手法は、フォン・ノイマン等が第2次世界大戦末期に原子爆弾の開発に関連して核分裂における中性子の拡散現象を電子計算機内で模擬して調べたことに端を発し、その後大発展を遂げるに至った。⁴⁾しかし、わが日本においても福島が戦前に満州の大連港の石炭積出ふ頭の計画にあたって、現在のシミュレーション手法を手計算で行った例が、よく知られてはいないが、残っている。そこでは、船舶の入港時間分布とふ頭での荷役時間と遊休時間、および着岸離岸に要する時間等を取り入れ、ふ頭前面の水深と船舶の吃水をも考慮して、ふ頭の適正な数を求めており、その考え方の斬新さに一驚する。

科学の分野での真似といえど、もう一つ、模型実験があげられよう。これも広義のシミュレーションには含まれてしまうと思われるが、一般的には、実際の模型を動かして特性を調べる模型実験と、実際の模型を造らないで机上の計算ですませる狭義のシミュレーションとは区別しており、単にシミュレーションと言った場合には狭義のシミュレーションを意味するといえよう。

模型実験は、寸法を縮小、拡大、または実寸で、ものによっては縦、横、高さの縮尺を変えることもあるが、いずれにせよ模型を造って動かすわけであり、重力加速

度 G や時間は地球上で実験を行う限り変えることはほとんど不可能である。実験結果のとりまとめにあたっては、必要に応じて相似法則等を利用して補正してから結論をひき出すこととなる。机上の計算であるシミュレーションでは、重力加速度も時間も自由に変えられることから、現象をいかにして計算式にするかが問題である。また、模型実験では模型を精密に造ることによって、未解明なことがらでもそれなりに模型に組み込むことが可能であるが、計算に帰着せねばならないシミュレーションでは、そのメカニズムを理論的に、もしも理論的に解けない場合には統計的現象としてでも、数式で表示しない限り、そのことがらはシミュレーションに組み込まれ得ない。

シミュレーションの場合には、現実の現象を忠実に真似しようとする、それこそ何もかも考慮して式をたてねばならず、実際にはそれは不可能であることから、シミュレーションを実行する目的に応じてあまり関係ないことがらは捨て去ることが、シミュレーションの効率を上げることにつながる。この、現象に付随する多くのことがらの取捨選択こそが、同一の現象をシミュレートしているにも拘らず異なったシミュレーションができ上る理由で、これはまたシミュレーションの目的やシミュレーションの作成者に大きく依存する。

それではこのように種々多様なシミュレーションがなぜかとも盛大に行われるようになったかを考えてみよう。

まず、科学が非常に進歩したといえども理論式がたたない、あるいは理論式がたてられても解くことのできない現象が世の中に存在し、しかも解明が必要である場合には、その現象を真似して解明しようとするシミュレーションが有効となろう。次に実際に行うことが現実問題として不可能な現象を解明したいときには、やはり、シミュレーションに頼らざるを得ないであろう。この種の問題としては、戦争における作戦の良し悪し、大震災が起きたときのパニックの影響の検討等があげられよう。3番目には、たとえ実験可能であっても、莫大な予算を要したり、時間が無制限にかかる現象を解明するときに、シミュレーションが利用される。このほかの場合でもシミュレーションを利用することはあろうが、ここで述べた3ケースの場合には、現状のところシミュレーション以外に有効な手法は考えられない。また、シミュレーションでは現象を真似するにあたって、非常に簡単なことがらだけをとり入れたり、相当複雑なことがらまでもとり入れたり、ことがらの取捨選択とその精度を変えることが簡便にできることから、現象全体に対するおのおのことがらの寄与の程度が把握できるといった利点もあげられる。さらに、電子計算機の驚異的な発展により従

来では不可能と思われていた大量の複雑な計算が、短時間に誰にでもできるようになった点も見逃せない。高速にして大型の電子計算機の出現によって、シミュレーションの適用範囲が飛躍的に拡大し、何もかもがシミュレーションで解かれるという事態が生じ、シミュレーションの隆盛を反映して昭和56年にはわが国にもシミュレーション学会が設立されるに至った。

このような次第で、シミュレーションはいまや多くの分野で利用されているが、ここにシミュレーションを作成したり、シミュレーションの成果を理解しようとする場合の留意事項をまとめてみる。

- ① ある現象を解明しようとするためにシミュレーションを行うのであるから、その現象を正しく認識すること。
- ② シミュレーションの目的に沿ってその現象を構成することがらを取捨選択すること。
- ③ 上記①と②をもとにして計算手順に変換すること。以上でシミュレーションの本体は完成するが、実際に利用するために
- ④ 正確な情報を得て、シミュレーションに入力すること。
- ⑤ シミュレーションで実行し、計算結果を得て、必要な判断を下すこと。
- ⑥ 計算法、計算量、予算、時間、労力等の資源量が適切な量であること。

も、実際にシミュレーションを行う際には重要なポイントである。①～⑥がどんなに立派であっても、予算の大幅な超過や、期限内に終了できなかったり、投入労働力ではシミュレーション本体の要求する精度で入力情報をまとめることが無理であるといった場合には、宝のもちぐされとなってしまう。

情報処理技術や解析能力の向上は目覚ましく、シミュレーションの開発は容易になったが、④のシミュレーションに入力する情報がシミュレーション負けして見劣ることも少なくなく、入力情報の量や質に限界がある場合には、それに見合ったシミュレーション本体の作成を考えることが、労力も少なく効率の良いシミュレーションを作りあげることとなり、信頼性も高まる。

かつては「電子計算機による。」のひとことで結果が容易に受け入れられた時代があったが、現在では計算機は計算を高速でしかも正確に行うだけで、計算手順は人があらかじめプログラムを作って計算機に教えておくということが普及し、電子計算機の威光も薄れてきたように、シミュレーションに関しても同様で、いまや、「シミュレーション結果による。」では通らなくなってきた。

シミュレーションでは、現象の把握による真似の仕方と入力データで、また乱数の操作でも結果はいかようにも変えることが可能である。したがって、シミュレーション結果を理解するには、そのシミュレーションが含んでいることがらとその間の関係、数式への変換技術、入力データの質等を十分吟味してから、結果を読むことが正道であり、結果のみを見ても意味はなく、その過程を理解することが非常に重要である。また、途中の過程が正しくとも、結果に明らかに誤りがあるときは、論理ミスや計算ミスをチェックする必要がある。考え方の立場によって誤解が生ずることもあるが、シミュレーションも我々の道具の一つであり、使い方に十分な気を付けさえすれば、やはり問題解決に有効な手法である。⁶⁾⁷⁾

本章では、以上の点を十分に吟味し、数多くの港湾計画、航路体系調査等に利用されているネットワーク・シミュレーションを説明するとともに、実例をあげて、計画担当者が得られる計画情報の範囲を提示する。

本章の構成は、5.2で我が国における海上交通シミュレーションを展望し、5.3で本章のメインテーマであるネットワーク・シミュレーションの開発を取り上げ、5.4でネットワーク・シミュレーションの港湾内交通への適用例を、5.5で広域な海上交通への適用例を述べる。

5.2 海上交通シミュレーションの展望

シミュレーションは現象の正しい認識と目的に応じて作成されるが、海上交通シミュレーションでは船舶を動かすことが基本であり、その動かし方は大別すると次の3つの型に分類される。

1番目の型は、おのおのの船舶の操縦性能をきめてあらかじめ与えられている運航判断基準に従って、舵による変針や機関による増減速を行って、海上交通を忠実にシミュレートしようとするシミュレーションで、以後、¹²⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²³⁾²⁴⁾²⁶⁾²⁷⁾この型をミクロシミュレーションとよぶ。

2番目の型は、海域をブロックにわけ、各ブロックには方向別に通過船舶の速力に応じた通過時間とブロック内に存在可能な船舶隻数（これは大型船、小型船、大小型船混合比に応じてかわり、以後容量とよぶ）が与えられており、通航船舶は、そのブロックを次々に通航していくシミュレーションである。この場合、航路の交差部分に相当するブロックでは容量の制約の他に、他方向船舶の有無もブロック内進入の制約条件となる。この型のシミュレーションを、⁸⁾¹¹⁾¹³⁾²⁰⁾²¹⁾²⁴⁾²⁵⁾マクロシミュレーションとよぶ。

3番目はシミュレーションとは少々異なるが、最近多くの海上交通計画で脚光を浴びている操船シミュレータである。これは、自船1船のみを取扱い、操船の部分をミクロシミュレーションよりもずっと精密にしたもので、²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾

舵角や機関回転数の設定に応じて与えられた船舶性能で動く。この操船シミュレータは、船舶性能の追求、操船訓練、水域施設計画に利用される。

実際に利用されるシミュレーションは、上の型に分類不可能な場合もあり、分類が可能であっても、操縦性の部分、操船の判断の部分、水域の設定方法、容量の考え方等のおおに特徴があり、まさにシミュレーション作成者のとり組みかたに依存してなかなか同じものとならないようである。

このほかにも、船舶の特性として全長と速力を与えるのみで操縦性に関する情報を与えず、運航判断は全長に依存する閉塞領域を用いて閉塞領域を侵犯しあわないようにして各船舶を動かすシミュレーション⁹⁾¹⁰⁾も、マクロシミュレーションの分類に入ると思われる。

海上交通シミュレーションの発展過程をみると、まずマクロシミュレーションから始まり利用されたが、それでは現象の細部を精密に真似できなくなることから、ミクロシミュレーションへと移行した。ミクロシミュレーションを実施すると、正確な入力データをすべて同程度の精度で準備する手間と、長時間の演算時間に直面して入力データの画一化とシミュレーションの場を狭くする方向に向い、その結果再びマクロシミュレーションが見直され、マクロシミュレーションの用途が拡大した。²⁵⁾ いまでは、まずマクロシミュレーションで行って、部分的な問題点をミクロシミュレーションで検討するといった手段もとられることがある。²⁴⁾

今後の方向としては、一つのシミュレーションですべての面から評価しようということは無理が生じてくることから、目的に応じてシミュレーションが作成され、さらに、その部分的な評価のためにシミュレーション結果を別のシミュレーションの入力とするといった形で、マクロ、ミクロ、シミュレータがお互いの長所を生かして短所を補うといった形に進むことと思われる。

また、シミュレーションは、海上交通理論の検証にも有効であることからその分野での利用も十分考えられよう。

マクロシミュレーションを、プログラムの親近性から分類すると、章末文献番号で(8),(9,10),(11,13),(20),(21),(22),(24,25)と7グループにまとめられ、ミクロシミュレーションは(12,14,15,16,23,24),(17,18),(19),(26,27)と4グループにまとめられる。グループに属する文献の数は章末に掲げた参考文献のみで分けたからで、おのおのの文献にあたるとさらにたくさんの文献がそのグループ内に存在することがわかる。(22)はミクロでもマクロでも説明を加えな

かったが、上で述べた型とは全く異なった管制を扱ったダイアグラムの思考のマクロシミュレーションである。ここで、マクロとミクロの区別、グループ別に関しては分類が難かしいものもあることから私見であることを断っておく。

なお、ここでは日本のシミュレーションのみを取りあげたが、シミュレータも含めて全世界の著名なシミュレーションリストは(32)にある。

シミュレーションは、目的に応じて作成されることから、目的を遂げるという用済みとなり、再使用されないことも多く、これは模型実験が終ると実験上屋は次の実験のために残しても模型は壊してしまうことが多いのと似ている。しかし、シミュレーションの場合、電子計算機は壊しはしないし、シミュレーションプログラムはリスト、カード、磁気テープに保管しておくことも可能であり、出番がくればいつでも使用できる形で保存されている。海上交通シミュレーションの目的は、海上交通に関する検討が多いことから、ある程度汎用的に作成しておけば、幾度でも入力データを変更するのみで利用は可能である。

そのような何度も利用されて実績のあるシミュレーションとしては、マクロシミュレーションでは(24)のグループ、ミクロシミュレーションでは(12)のグループ、(17)のグループ、(26)のグループがあげられる。しかし、本格的なミクロシミュレーションとしては、(17)のグループだけといえよう。(12)のグループのシミュレーションは操船に関しては野本の式の操縦性指数 K 、 T を用いるが、航跡の決定は、それが最終的に意味する旋回円の角速度と、舵角を設定してから変針するまでの時間にとり入れており、直線と円で航跡を近似している。運航判断に関しては、いろいろな二船の出会いに対して、お互いの船の全長、速力等による回帰式を利用して航過距離を求めている。このモデルは、備讃瀬戸航路の交通容量問題にはじまり、友ヶ島水道、関門海峡、伊良湖水道、浦賀水道等運輸省港湾局で利用されており、マクロシミュレーションの(24)を補完する目的で利用されることが多い。

(26)のグループのシミュレーションは、シミュレーション開発者の考え方が前面に押し出されたシミュレーションで、ミクロ的に船舶の動きを追っても、一船一船の性能は異なるし、同一船でも載荷条件や自然条件によって変化することから、船舶運動のシミュレートは思いきりよく粗くして、運航判断に重点を置いて、判断の結果この方向へこれだけ船舶が進めればよいとなったら、所要の時間後にはその場所へ船舶が動いているとしたものである。これは比較的最近のシミュレーションである

ので、従来のシミュレーションの短所を犠牲にして、長所をとろうとしている。

マクロシミュレーションとしては、海上交通のシミュレーションでは史上最も数多く利用されていると思われる本章で取り上げる(24)のグループがある。これは、マクロシミュレーションで説明したブロックを、性格上から、リンクとノードにわけた典型的な待ち行列型のシミュレーションである。

シミュレーションは目的に応じて作成されると5.1で述べたが、(37)はその例として、管制を実施した際に生ずる問題点の解明を目的としたシミュレーションである。これは、どちらかという(22)のグループの系列に入るマクロシミュレーションであるが、その結果の評価にシミュレータによる検討を加えている。

シミュレーションは作成者の意図に応じて開発され、そして利用されるが、その客観的な正しさを証明することはなかなか難しい。最も確実な方法は現実との合致を調べればよいが、これとても、一船一船の通過時刻や速力、航跡を比較することは大変である。そのため、実際の航跡から統計的性質を求め、それとシミュレーション結果の統計的性質を調べようという方法の提案が(38)である。したがって、(38)はシミュレーションから離れて、現実の海上交通の特徴を解析したものともいえる。

(39)は、海上交通シミュレーションで問題の一つに必ずあげられる運航判断部について科学的決定法を述べたものである。ミクロシミュレーションが運航判断部に海上交通流のマクロ的性格の閉塞領域を採用したり、統計的性質から運航判断を下すということは、当事者の船舶にとっては奇異なことであり、それらは、個々の船舶の独自の動きがたくさん集ってできた結果である。したがって、原点にもどってミクロシミュレーションの判断部を作成するには、二船間の出合いの状況をもとにしようという考え方によっている。

5.3 ネットワーク・シミュレーション

5.3.1 概説

海上交通のシミュレーションは、交通量が増大したり、新型船の出現も含めて交通量に占める船種・船型の構成比がかわったりするといった航行船舶の量や質の変化が予測されるとき、および航路の拡張や新設等海上交通の場に変化が予測されるとき、さらには航路分離や管制の導入といった海上交通方法をかえようとするときに、それらの変化によって海上交通に生ずる問題点を事前に把握して、その程度をあらかじめ評価しようとするために実施される。評価の結果、とくに問題点が指摘されなかったり、その程度が軽微の場合は、シミュレーションに

よって計画の妥当性が確認されたことになる。シミュレーションを実施した結果、問題点が浮きぼりにされ、しかもその程度が許容できないような場合には、シミュレーションの条件である航行船舶の量と質、海上交通の場および海上交通方法の変化のうちで、浮きぼりにされた問題点を小さくする方向へ、人為的に変え得るもののみを変えて再度シミュレーションを実施し、問題点が許容し得る範囲を見出すことがシミュレーション実施の目的である。

このことからわかるように、海上交通のシミュレーションは、海上交通に変化が生じたり、変化を生じさせようといった場合に、その結果を予測するために利用される。ここではこのような目的になかったシミュレーションの一つとして、開発したネットワーク・シミュレーションを扱う。

ネットワーク・シミュレーションは俗称であって、海上交通流のマクロ評価シミュレーションともよぶべきであるが、俗称が一般的になったものである。したがって、他分野でよばれているネットワーク・シミュレーションとは関係がない。

ここで説明するネットワーク・シミュレーションは、昭和50年に実施された東京湾の海上交通安全システム⁴⁰⁾調査において述べられている「今後、この簡易航路シミュレーションは、航路体系の評価にあたっては不可欠になるであろう。」という文章中のシミュレーションであって、その後、章末の参考文献に見られるように、航路体系調査、港湾計画調査に数多く利用されており、航路容量、安全性、航行規制、ふ頭の数や泊地容量の検討に威力を発揮している。

その理由は、以下に述べるように、シミュレーションモデル自体の簡明さにより、海上交通問題解明に要求される多くの機能を容易に付加できることと、仮定と結果のわかりやすさによっているといえよう。

5.3.2 ネットワーク・シミュレーションモデル

1) モデルの概要

船舶交通の評価シミュレーションは、与えられた自然条件および社会条件のもとで船および船をとりまく力学的特性に基づいて、しかも、あらかじめ設けられたおのおのの船舶に応じた操船判断基準に従って、数多くの船舶の航行を机上で計算し、現実の海上交通をシミュレートするミクロシミュレーションがある。そこでは、船長の判断を組み込んで、変針・変速の頻度、避航時間分布、異常接近の回数等をもとにして目的に応じた海上交通評価を行う。

しかし、船舶の運動計算や波・風・潮流等の外力の計

算には粗い近似が入り込み、また船長の行動をシミュレートする操船判断部に至っては人間の意志決定といった、現代科学では比較的不得手な領域に踏み込まざるを得ず、万人が納得する手法をうち立てることは非常に難しい。もちろん、近似の精度を上げ、船長の操船判断基準がある程度もっともらしくすることは不可能ではないが、そのためには用意周到にしかつ膨大な事前調査と綿密な研究に基いた大量のデータを駆使した大量の計算を必要としよう。

したがって、船舶交通量の多い広大な海域における船舶交通上の問題を解明しようという場合には、上述したミクロなアプローチでは限界があるばかりでなく、限界をどこにおけば全体の精度がそろうかといった問題も生じてくる。

そこで全く視点をかえ、ミクロな船舶の動きを追求することを断念して、交通流をマクロ的に取り扱おうというアプローチをすることにより、ネットワーク・シミュレーションが誕生した。

ネットワーク・シミュレーションは、船舶の交通路をリンク（直線部、もしくは曲線部）とノード（結節部）の連なりからなる図-5.1のようなネットワークで表現する点が特徴的である。すなわち、本来、平面的である船舶交通を、船舶の進航については一次元的な線として表す。船舶はその線上のみを航行し、それらの航行経路に対応する線が平面上で絡み合っている陸上交通の道路のように船舶交通路を扱う。それらの線の交点もしくは端点（始点と終点）がノードであり、交点以外の線の部分がリンクである。

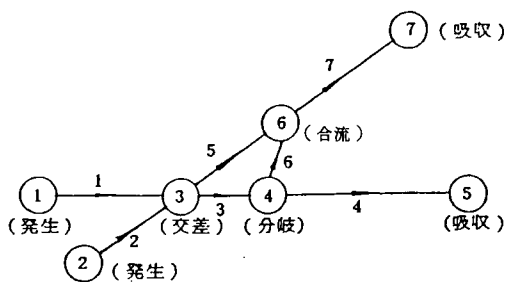


図-5.1 ネットワーク

おのおののリンクとノードには、それを通航する船舶の船種・船型（以後、船舶のタイプとも呼ぶ）に応じた通過時間を確率分布で与えておき、さらに、そのリンクもしくはノード上に存在し得る船舶の最大隻数（実際には隻数ではなく船舶タイプに依存する船舶当量であるが、

この量を以後リンクもしくはノードの容量とよぶ）も与えておく。実際に、これらの量および交通経路を与えるにあたっては、2で述べた最近著しく発達した海上交通実態観測結果を利用するが、観測結果がない海域においては類似の海域の観測結果を準用する。

船舶は、このように通過時間と容量をもつリンクとノードの連なりの場を、経路ごとに与えられている確率分布に従って発生し、当該船のタイプによる速力分布に応じて計算される通過時間に従って、ノードからリンクへ、リンクからノードへと次々に経路上を進んでいく。ここで、次に入ろうとするリンクやノードの容量が他船に既にふさがっていれば、そのリンクやノードの前で待つ。また、交差ノードで交差方向に船が通過している場合には容量に関係なく交差船が通過終了するまで待つ。

このようにして、ネットワーク上を、船舶が始点から終点まで向うときに、途中の混雑の程度を、待ち時間や待ち隻数の確率分布等さまざまな統計量を求めて、この交通流を評価する。

図-5.2は、ネットワーク・シミュレーションの基本型のプロチャートである。ここで、基本型と断ったのは5.3.3で述べるようにネットワーク・シミュレーションには数多くの変形があることによる。

シミュレーションタイムは、図-5.2に示すように、イベントシーケンシャルによって進める。リンク入りおよびノード入りの時刻は、入る予定のリンクまたはノードの『待ちの状態』によって決定される。すなわち、リンクやノードにその時点に存在する船の当量の合計がそのリンクやノードの容量に達しておらず、入ろうとする船の当量より大きな余裕があれば、ノード出およびリンク出の時刻がそのままそれに続くリンクおよびノードの入りの時刻となる。すでに、容量がふさがっており、当該船の当量が入る余裕がないときは、リンク待ち、ノード待ちの状態となる。この場合は、他船がそのリンクまたはノードを出たあとに、自船が入りこめるだけの当量の余裕ができたときに待ちが解除され、その時刻がリンク入、ノード入の時刻となる。

リンク出、ノード出の時刻は、所定の確率分布に従って乱数を発生させて得た通過時間を、リンク入、ノード入りの時刻に加えた値となっている。

なお、交差ノード等における優先船と非優先船が出会う場合、または、先にノード入りした船と後ろから入ろうとする船の方向が異なる場合は、その両者が同時にノード内に混在しないようにしている。すなわち、優先船または先着した異方向の船がノードを航行中の場合は、非優先船または交差船は、ノード容量に余裕があっても、

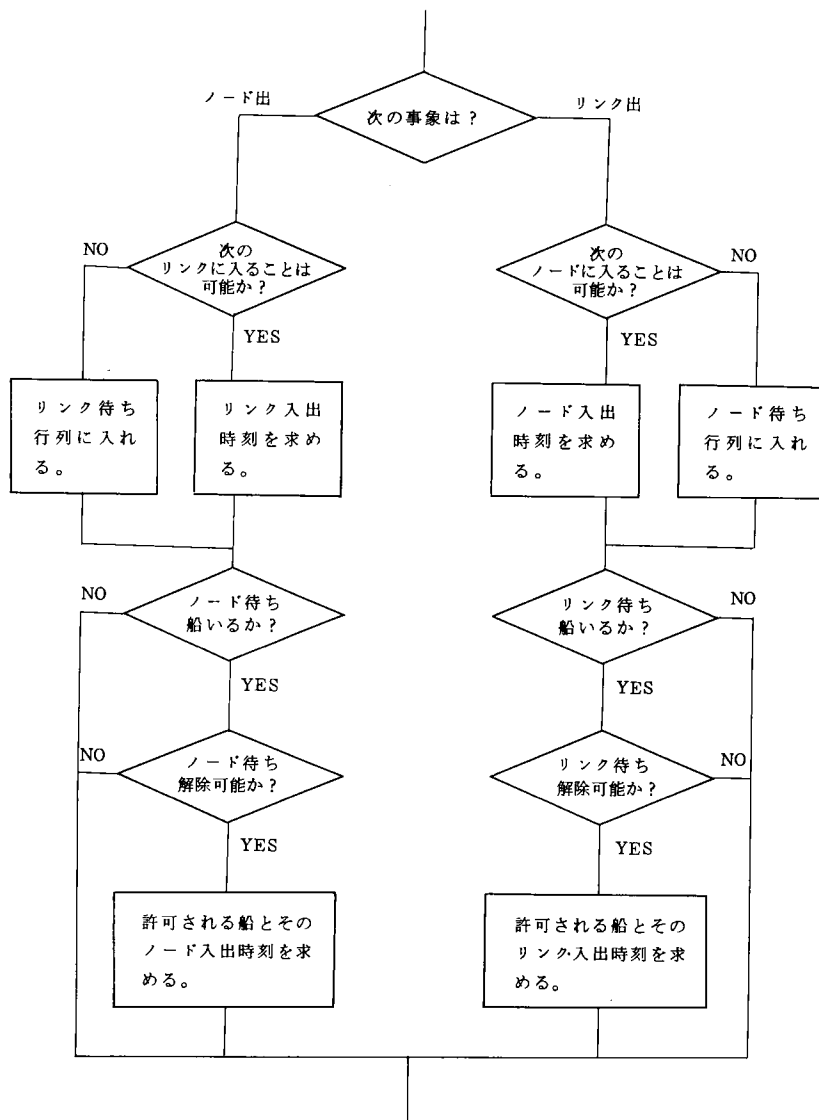


図-5.2 シミュレーションのフロー

そのノードへ入ることはできない。また、他方向船がノードを出て容量に余裕ができたばかりでも、他方向の後続船がある場合には、ノード待ちが解除されない。

2) ネットワーク・シミュレーションにおける容量

ネットワーク・シミュレーションにおいて、容量は結果を左右する重要な入力情報であり、シミュレーション結果を理解する際にも容量の概念を正しく把握しておく必要がある。したがって、ここではネットワーク・シミュレーションにおける容量の定義を、取扱いが単純な1レーンの場合、および複雑な複数レーンに広がる場合について、閉塞領域⁷¹⁾⁷²⁾を前方 $8L$ 側方 $3.2L$ として以下に示し、あわせて通過時間についても考察する。ここに、 L は船舶の全長である。

(1) 1レーンの場合

ネットワーク・シミュレーションにおいては、図-5.

3のようにノードとノードの間をリンクで接続して航路網が形成されている。

ここで、ノードを通過する時間を求める場合、

$$\text{通過時間} = \text{ノード実距離} / \text{船速}$$

で与えると、閉塞領域の概念が入らない。閉塞領域を侵さないことを基本として航行安全の程度を評価するためには、ノードの通過時間として船型 i の大きさに応じて、最小 $8L_i$ の距離を、船種ごとに与えた速力 V_i で除したもので与えれば $8L$ の閉塞距離の概念が入れられることになる。

図-5.3では、ノードの距離を船型ごとに $8L$ ずつとって、当該船種の平均船速で除したものをノード通過時間とし、その分だけ隣接リンクの距離が船型に応じて減じられ、リンク通過時間は減じられた距離を当該船種の

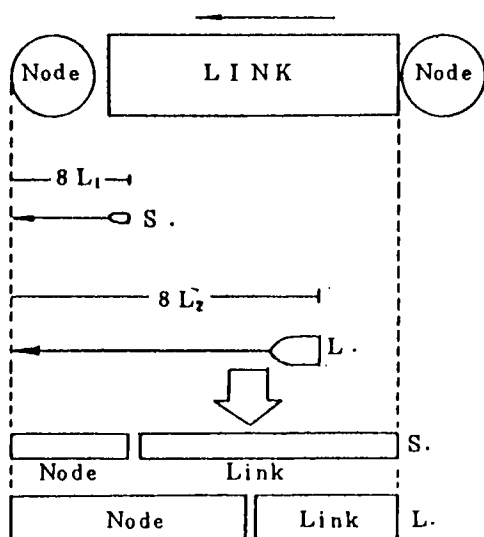


図-5.3 通過時間

船速で除して与えられることを意味している。このように、各船型ごとのノードの距離の増加分を隣接リンクから減じている。図-5.3でSは小型船で全長 L_1 、Lは大型船で全長 L_2 であり、図の下部の長方形の横の長さは、Sが小型船、Lが大型船の場合のノードおよびリンクの各通過時間の計算に分担する距離を示している。

併航を許さない1レーンの場合には、以上の方法で、ノードおよびリンクの通過時間は矛盾なく求められる。また、この場合はノードおよびリンクの容量は、船型に関係なく1に設定し、船舶当量も1に設定する。

(2) 併航の場合

幅の広い航路にあっては、船舶が併航できるようにする。そのために、船型に応じて与えられた全長 L に対して、 L 換算、 L^2 換算による当量を与えて、指定されたリンクやノードで適切な当量を用いるように当量を交換する機能を付加した。

これは、ノードおよびリンクの容量と通過時間を決めるためのものであり、ノードおよびリンクにおける容量および船舶当量は以下のとおりである。

a) ノードの容量

ノードは、リンクとリンクの結節点であって、長さが短いため、 L^2 換算当量でノード容量を計ると、船舶が通過できない場合が多くなる。したがって、全長 L の船舶の場合、航路幅を $3.2L$ で除した値をその船型の船舶併航可能隻数とするように、ノードの容量は航路幅で与え、船舶当量は $3.2L$ で与える。ただし、大型船では $3.2L$ で当量を与えると航路幅を越えて容量面からはノ

ード通航不可能となる場合も生じ、通れなくなるので、この場合に限って、大型船が通過できるように、しかし同時に他船が通れないようにするため、航路幅/ $3.2L$ をもって大型船の当量とした。

例えば、航路幅が700mのとき、全長が219mより小さい船舶($700/3.2 = 219\text{m}$)の船舶当量は全長で与えてかまわないが、219mより大きい船舶の船舶当量はそのノードを通過できるようにするために219mとする。ノード容量は700である。

この場合もノード通過時間については、各船ごとに $8L$ 値を求め各船速で除した値とすることは、(1)と同じである。また、船型によって $8L$ 長が、隣接リンクにはみ出たり、少なすぎたりする場合には、それぞれ隣接リンクの距離を船型ごとに求めて各船種の船速で除して、リンク通過時間とするようにし、端数はすべてリンク側で調節している。

b) リンクの容量

リンクの容量は、各船種・船型の L^2 換算当量で行う。具体的に示すと、『リンクの長さ×幅』を容量とした。船舶当量は、リンクでは $8L \times 3.2L = 25.6L^2$ とする。この場合も、船舶の当量より小さい容量のリンクには、船舶が入れなくなることから、そのリンクに限って船舶の当量を、リンク容量/ $25.6L^2$ で与える。

このように、リンク容量を定める場合にはリンクの長さを必要とする。ここで、リンクの長さは、(1)の結果より、船型によって隣接ノードの影響を受けて異なる値となる。そうするとリンク容量が一定に与えられない。そのため、近似的に、船舶の交通量の荷重付き平均全長を用いて隣接ノード長を計算してから、リンク長を計算して容量を決めた。リンク通過時間は、(1)で述べたように前ノードにおいて全長の $8L$ を既に通過時間として考慮しているから、それをさし引いてどの船型の船舶に対しても矛盾がないようにしている。すなわち、容量に関しては多くの船型の船舶が混在する場合は、すべての船舶に対して厳密に決定できずに、近似的な容量で与えざるを得ない。しかし、この場合でも通過時間に関しては厳密な値となっている。このような容量決定に関するあいまいさは、現実においては流動的である閉塞領域と船舶当量を固定しているためであると考え、ある程度納得のいく決定法であるといえよう。

c) ノード間隔が近づきすぎる場合

隣接ノードが近すぎて、 $8L$ 長をとれない場合は、やむを得ず、実長をそのまま使用して通過時間を与え、リンクの通過時間をゼロとしている。このようなノードにおける待ちは、閉塞領域の $8L$ を取れないために、本来

の待ちよりも小さくなる。本来の待ちは、閉塞領域の 8 L を取れる場所へ移行する。したがって、隣接ノードが近い場合には、以上の点に注意して、シミュレーション結果を読まなければならない。

3) シミュレーション・データの入力部

図－5.1 のネットワークにおいて、丸で囲んだ数字がノード番号を表し、囲まない数字はリンク番号を表している。

ネットワークの入力方法は、ノードの場合にはノード番号とその平面座標値を入力する。リンクの場合には入力する必要がなく、以下に述べる経路情報をもとにして入力プログラムが自動的にリンクを探しだしてリンクの番号づけを行う。

船舶は図－5.1 のようなネットワーク上を通航している場合、経路情報は次のように与える。

経路 1 ①→③→④→⑤

経路 2 ①→③→④→⑥→⑦

経路 3 ①→③→⑥→⑦

経路 4 ②→③→⑥→⑦

経路 5 ②→③→④→⑤

経路 6 ②→③→④→⑥→⑦

これは、説明上、この 6 経路に限ただけであり、実際には上の 6 経路の逆経路や①→③→②、⑤→④→⑥→⑦等の経路も可能で、さらに①→③→④→⑥→③→④→⑤といった経路も可能である。

次に、対象船舶の船種・船型については、例えば、3 タイプある場合には次のように与える。

船舶タイプ 1、全長 200 m、速力 10 ノット

船舶タイプ 2、全長 100 m、速力 12 ノット

船舶タイプ 3、全長 50 m、速力 8 ノット

もちろん、これらも同一タイプに属する船舶の全長と速力が同じでなくともよく、全長、速力ともに船舶タイプごとに確率分布で与えることも可能である。速力は場所に依存してもよい。

次に、リンクやノードの容量を計算するために、航路（リンク）幅を与える。これも場所に応じて異なってもよい。

さらに、各経路ごとに船舶タイプごとに応じた船舶発生量を確率分布で与えるが、発生時刻が決まっているタイプの船に対しては時刻表等の値をそのまま与える。

最後にシミュレーション終了時間を与える。

入力データは以上である。入力部のプログラムはこれら入力データを電子計算機に読み込むばかりでなく、後につづくシミュレーション実行部分で入力データの情報を容易に利用できるように配列がえ、経路の情報からリ

ンクを取り出してきてリンクの番号付け、さらにはノード・リンクの容量計算や各経路各船舶タイプ別の各ノード・リンクごとの通過時間の計算、隣接リンクの角度を求めて交差や合流や分岐の情報作成等、各種の計算と作表を実行する。なお、ノードやリンクの数、経路の数、船舶タイプの数等は電子計算機の容量によって制限を受ける。現在までの最大数はノード数で約 2,000、リンク数で約 1,000、経路数で約 400、船舶タイプ数で 25 である。

4) シミュレーション実行部

シミュレーション実行部では、入力部プログラムが入力データを加工して作成した数多くの情報を駆使して、海上交通をシミュレートし、その経過を次々に出力ファイルへ記録して、次の出力部プログラムへ引き渡す。

実行部の具体的内容は、各経路ごとに次々と発生する船舶を与えられた速力でその経路上を進ませ、ノードやリンクの進入時刻と退出時刻を記録していくことである。船舶が経路の最終ノードに到達したときに、船舶の識別番号、船舶タイプ、経路番号および記録しておいた経路上のすべてのノードとリンクにおける進入時刻と退出時刻を、一まとめのデータとして出力ファイルへ記録し、その船舶をシミュレーションの場から取り除く。

この際、次のリンクやノードに進入する規則として、自船が入ることによってそのリンクやノードが容量を超過する場合には、進入不可能として手前で待つ。また、二つの経路が一つのノードで交差していて他経路の船舶がそのノードを通過中の場合には、容量を超過しなくとも、もう一方の経路の船舶はそのノードへの進入を不可能として手前で待つこととしている。待ちの解除は他船の進航によって次のリンクやノードの容量に自船の入れる余裕ができた場合であり、交差ノードにおいては、容量の余裕に加えて、交差する他経路の船舶がそのノードの通過を完了した場合に限る。

なお、この実行部ではシミュレーション過程を記録するのみで、その統計量をとらない。その理由はノードやリンクの数が多し上に船舶タイプも経路も多いことから、統計量をとるテーブルを電子計算機内に設けると電子計算機の記憶容量が不足すること、および実行プログラムが相当複雑になって 5.3.3 で述べる種々の機能付加に支障をきたすことによる。

シミュレーションを実行していく際の時計の進め方は、Δt 時間ごとに時計を進めるタイムスライス方式ではなく、船舶の発生や消滅およびノードとリンクの進入と退出といった事象の変化ごとに時計を進めるイベントシケンシャル方式である。

5) シミュレーション出力部

出力部プログラムは、実行部で作成されたシミュレーションの経過の情報をもとにして入力部で作成した情報とつぎ合せながら、各種の統計量を求めるものであり、以下に述べる出力項目がある。しかし、ここで述べる以外の統計量に関しても、シミュレーションの過程をすべて保存していることから、統計量を求めるプログラムを作成することによって、シミュレーションを再度実行することなく、任意の統計量が容易に求められる。

- (1) ノードとリンクにおける待ち時間分布
- (2) ノードとリンクにおける待ち隻数分布
- (3) ノードとリンクにおける待ち船の比率
- (4) ノードとリンクの利用率
- (5) 経路ごとの総トリップ時間
- (6) 以上の統計量の図面表示
- (7) シミュレーション過程の16mm映画

ここで分布の場合は、その平均値と標準偏差も求められている。(1), (2), (3)に関しては全船舶に対してもある船舶タイプに対しても、全経路に対しても、特定リンクや特定ノードに対しても、全時間に対してもある時間帯に対しても、またこれらすべての組合せに対しても求めることが可能である。これは、2で扱った海上交通の実態を解析する場合と同様である。

(4)は、一般の待ち合せ理論において混雑度を表す量である利用率 ρ を、ネットワーク・シミュレーションに拡張した量である。

一般の待ち合わせの系においては、 S 個のサービス窓口に単位時間当り平均 λ 人の客が到着し、一人の客の平均サービス時間を $1/\mu$ 時間とすると、その窓口の利用率 ρ は、 $\lambda/S\mu$ で定義される。この値は、サービス窓口等施設の利用率の概念と完全に一致する。

この利用率をネットワーク・シミュレーションに転用する。その場合、次の点に注意を払う必要がある。船舶の到着は、客のように常に1人が1つのサービス窓口を利用するというわけではなく、大型船や小型船等の大小に応じて、サービス窓口に対応するリンクやノードの利用量が異なることである。具体的にいうと、大型船1隻で水路が全部ふさがったり、あるいは小型船が数隻入ってもまだ水路に他船の入る余裕があるという現象が起こることである。そのために、リンクとノードの容量および船舶の当量を定義したのであって、この点を考慮すると、リンクとノードの利用率は次のように定義できる。

なお、リンクやノードは船舶の航行する航路を形成しており、他のシミュレーション¹⁷⁾¹⁸⁾において航路の直線部分、交差部、合流部、分岐部等を航路要素とよんでいること

から、ネットワーク・シミュレーションにおいても、航路要素とよび、以後、リンクとノードを特に区別しない場合には航路要素と総称する。

航路要素(リンクまたはノード)における利用率 ρ は、

$$\rho = \lambda / C \mu \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

である。

式(5.2)において、

λ : 単位時間当たりの平均到着船舶当量

$1/\mu$: 船舶の1換算当量あたりの当該航路要素(リンクまたはノード)を通過するのに要する平均所要時間

C : 航路要素(リンクまたはノード)の容量である。

したがって、 n 船舶タイプあって、 i 船舶タイプの船舶当量を s_i 、単位時間当たりの平均到着隻数を λ_i とすると、

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i s_i \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

である。

また、 i 船舶タイプの平均通過時間を $1/\mu_i$ とすると、

$$1/\mu = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i / \mu_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i \right) \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

である。

以上によって ρ はまた上の λ_i 、 s_i 、 μ_i を用いて

$$\rho = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i / \mu_i \right) / C \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

と表される。

C は、3)で示したように、ノードの場合には航路幅で与え、リンクの場合には航路面積で与える。船舶 i の換算当量 s_i は、船舶 i の全長を L_i としたとき、その船舶の閉塞領域の進航方向の長さ aL_i と、横方向の長さ bL_i を用いて、ノードの場合の換算当量は bL_i とし、リンクの場合の換算当量は $aL_i \times bL_i$ とした。

a 、 b の値は、通常の場合 $a = 8$ 、 $b = 3.2$ といわれていることから、この値を踏襲した。

ρ は、上の定義からわかるように、シミュレーションの実行の有無に関係せず、したがって入力データを作成した時点で得られる値である。

その段階で、 $\rho \geq 1$ の航路要素が検出された場合には、そこでは待ち船の数が時間の経過とともに増大することであるから、交通量を減らすか、一部の船舶に関して経

路変更を行うかして、 $\rho < 1$ としてから、シミュレーションを実行する。その航路要素では混雑が大であるばかりか、交通量が飽和することが、シミュレーションの実行以前に理論的にわかったことになるからシミュレーションを実行しなくてもよい。

逆に、すべての航路要素で $\rho \ll 1$ であることが確かめられたならば、この交通体系は、輻輳上の観点からは何も問題が無いといえる。問題が生じはじめるのは、経験的ではあるが、 $\rho > 0.05$ くらいからではないかと思われる。

利用率は、到着当量と通過時間および航路要素の容量で計算でき、シミュレーションの実行以前に定義されるこの ρ のほかに、シミュレーションを実行してはじめて得られる ρ' と $\hat{\rho}$ も定義できる。

ρ' は、シミュレーションを実施して航路要素に待ち船が生ずるときに、その待ち船もそのリンクやノードの容量を使っているとする立場に立つ利用率である。すなわち、式 (5.1) で、平均所要時間の代りに、待ち時間をも含めた実所要時間を用いればよい。厳密に定義すると、上とは記号がかわるが、航路要素の通過時間に加えて待ち時間をも考慮した利用率 ρ' は、

$$\rho' = \sum_{i=1}^N c_i (t_i + w_i) / CT \quad \cdots \cdots \cdots (5.5)$$

- i : 当該航路要素を i 番目に通過する船舶
- c_i : 当該航路要素を i 番目に通過する船舶の船舶当量
- w_i : 当該航路要素を i 番目に通過する船舶の待ち時間
- t_i : 当該航路要素を i 番目に通過する船舶の通過所要時間
- T : シミュレーション継続時間
- C : 当該航路要素の容量
- N : シミュレーション継続時間中に当該航路要素を通過した全隻数

で与えられる。

この ρ' は、待ち時間をも含んだ利用率であるから、実際に観測するときの利用率と一致する量である。すなわち、 t_i は本来の速力で航行したときに当該航路要素を通過する時間であり、 $t_i + w_i$ は輻輳している場合の減速もしくは遠回り等の避航による当該航路要素の通過時間にあたるから現実の利用率となる。この ρ' は、また、2. で述べた海域の密度とも密接な関係にある量である（付録・D 参照）。

すべての船舶の待ち時間が 0 ならば、当然 $\rho = \rho'$ と

なり、一般に $\rho \leq \rho'$ の関係がある。この ρ' を求めるには待ち時間 w_i を必要とするので、シミュレーションを実行しなければ得られない。

$\hat{\rho}$ は、シミュレーションを実行して求めた待ち時間を考慮しない利用率である。したがって、シミュレーションが正しく行われているならば、式 (5.1) に一致する。

$$\hat{\rho} = \sum_{i=1}^N c_i t_i / CT \quad \cdots \cdots \cdots (5.6)$$

（用いられる記号の意味は ρ' の定義の際と同じとする）

である。

$T \rightarrow \infty$ とすると $\hat{\rho} = \rho$ が成立する筈である。この関係を利用してシミュレーションが正しく行われたかをチェックできることから $\hat{\rho}$ の値も出力部では求めている。

利用率に関連した値では、ここに述べた $\hat{\rho}$ 、 ρ' のほかに、 ρ と ρ' を用いた両者の比 ρ' / ρ の値を、すべてのノードとリンクで求めている。

ρ' / ρ の値の意味は、例えば、 $\rho' / \rho = 1.1$ とすると、空いていれば 10 分で行けるのに混雑によって平均的に 11 分かかるということである。この値は待たない船舶をも含めた平均通過所要時間である。待った船舶だけの平均待ち時間は、③の待ち船率を勘案して加重平均を計算することによって求められる。

なお、シミュレーションが正しく実行されたか否かのチェックに関しては、この ρ のほかに、当然ながら、経路別の発生隻数、ノード、リンクの通航所要時間のチェック等入力データの値と実際のシミュレーションで使った値とを容易に比較できるような一覧表も出力している。

(7) のシミュレーション過程の映画化は、シミュレーションの途中経過が理解できるように、シミュレーション実施中の過程を映画化して、静的な式や数値に加えて、視覚による動的な理解を試みたものである。これは、従来のシミュレーションの多くが、シミュレーションの仮定とフローチャートと結果のみで構成されており、途中経過の詳細は電子計算機内で行われ、見る事が不可能であることから、比較的ブラックボックス的色彩を帯び、シミュレーション作成者の良心にまかざるを得ないという科学的に幾分不明瞭な点を伴いがちであったことを打開するために実施したものである。この試みは、シミュレーションの内容が「専門的過ぎる」とか「理解し難い」といった欠点をいくらかでも軽減しようという意図からも出発している。図-5.4、図-5.5、図5.6に映画の一面面を示す。

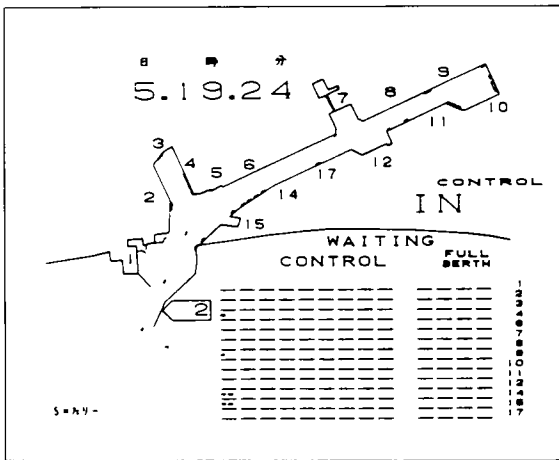


図-5.4 シミュレーション過程の映画
(苫小牧港西部地区)

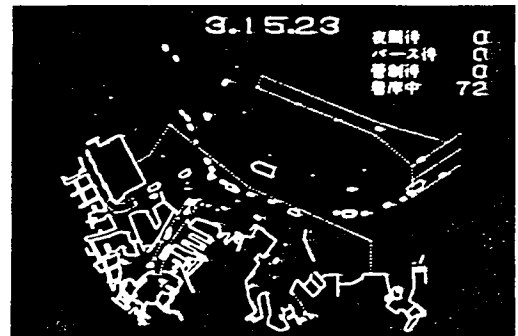


図-5.6 シミュレーション過程の映画
(横浜港および沖合)

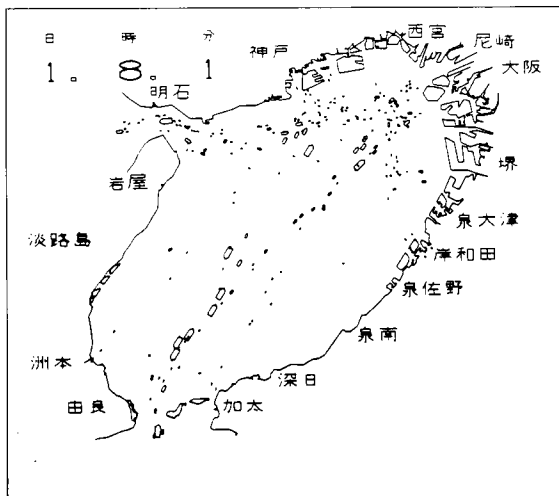


図-5.5 シミュレーション過程の映画
(大阪湾)

図-5.4は5.4で扱う苫小牧港西部地区の例である。図-5.5は6で扱う大阪湾におけるシミュレーションの例である。図5.6は横浜港の例である。なお、図5.5、図-5.6の船舶の大きさは、実寸では大小の判別が難しいので閉塞領域で用いる全長を L として進行方向 $8L$ 、横方向 $3.2L$ の進行方向に尖った五角形で船舶を表した。

6) 評価

出力項目で得られた情報はそのまま海上交通流の評価に利用される。

待ち時間は避航時間として、待ち隻数は避航した船舶の数として読めば現実の海上交通に結びつけられる。

例えば、あるノードにおいて待ち時間が1分以上の確率が3%とするとそこを通過する船舶のうち100隻に3隻の割合で1分以上の避航を余儀なくされる。これは船舶タイプごとにも得られるので、大型タンカーにとってこの程度なら我慢できるとか、こう頻繁では別な代替案が望ましいといった判断を下す情報として有効である。

待ち時間と待ち隻数についての絶対的な評価値が決められると非常に便利であり、ネットワーク・シミュレーションを利用するメリットが増大する。しかし、その場所の地形、交通量、航行援助施設等の環境に起因する条件によって評価値が変わることが多いので現状のところは決めていないでケースバイケース個々に検討している。与えられた条件の下での絶対評価値を決めることは今後の課題として残されている。

経路ごとと船舶タイプごとの総トリップ時間は、広大な海域の航路体系を評価するときに用いられるが、待ちが途中で全くないとした場合の待ちなし総トリップ時間との差を用いて、新経路計画等を検討する。

以上の評価項目の他に、5)の利用率を用いても評価する。そこでは、3種類の ρ 、 ρ' 、 $\hat{\rho}$ を定義し、さらに ρ'/ρ をも求めた。 ρ と $\hat{\rho}$ はシミュレーションが正しく作動すれば一致する値であり、 ρ は入力データを作成する段階で求められ、経験的に相当混雑した海域においても0.2を越えることは少ない。 ρ' は定義式からも容易にわかるように、交通量の増加に伴って直線的に増加するが、 ρ' は交通量が少ないうちは ρ と等しく、し

たがって直線的に増加する。しかし、交通量が多くなると ρ' は待ちによって急上昇するので ρ'/ρ の値が大きい場合には通航が難かしくなる。この値が1に近い場合は待つことが少なく、通航上問題は生じない。

海上交通の輻輳度に関する結果の解釈は、閉塞領域をふれあわせないようにして待ち時間で論ずるので、容量と通過時間の概念を正確に把握することを必要とする。しかし、バース数や泊地容量の検討、各種の規制の効果の測定に関しては、船舶のミクロな運動やきめ細い操船判断は結果に影響を与えないことから、入力データを正しく与えさえすればネットワーク・シミュレーションによって正しく評価することが可能である。

以上は数値結果による評価である。ここでは、数値結果による評価以外に、工場や事務所や商店のレイアウトにメモーションカメラを用いた映画による効果的な評価がなされたように、シミュレーション過程の映画化も取扱った。これは、シミュレーションの方法を視覚化して計算の正しい実行を確かめられるばかりでなく、海上交通の全体像を評価する上からも非常に効果を発揮する。

評価の項をしめくくるにあたって、ネットワーク・シミュレーションの原理である既述の「定速の船舶がリンクやノードの手前で進入不可能のとき瞬間的に停止し、進入可能となった瞬間に再びもとの定速で動く」の妥当性については、平野が²⁷⁾海上交通の避航と陸上交通の横断待ちとの類似を発表しており、また大嶋による²⁶⁾備讃瀬戸東部の避航船舶の割合が、同一の海域のネットワーク・シミュレーション結果の、¹¹⁾待った船の割合とほぼ一致しており、それほどこじつけの原理ではないことが確かめられている。このことは、輻輳度の評価についても、相対評価のみではなく絶対評価の可能性を示唆している。

5.3.3 機能の付加

ネットワーク・シミュレーションの基本的な部分を5.3.2で述べたが、実際の海上交通をシミュレートするには機能が不足する。以下の各項の機能は実際の海上交通計画をシミュレーションで実行するために付加した機能である。

1) 船舶の発生分布の時間的変動

船舶交通量は時間によって変動する。しかし、短い時間帯においては、ある平均値をもつランダムな分布であることが確かめられており、時間が経過するにつれて平均値が変わることが多い。これは、深夜、朝、昼、夕方によって交通のパターンが変わる場合が多いことから容易に予想される。問題とされる混雑時のシミュレーションの実施が重要であると同時に、船舶の発生分布を時間的に

変動させて、混雑時に生じた混雑が消失していく過程をみることも重要であり、そのために付加した機能である。この機能によって、より現実に近いシミュレーションの実行が可能となるばかりでなく、混雑時にある航路要素の利用率が1を越える場合でも、シミュレーションの実行が可能となる。

2) リンク容量の時間的変動

リンク容量を時間的に変動できるようにした。これは、航路内での漁船の操業を評価するために付加した機能である。また、本機能は、リンク容量を時刻に応じて0とすることにより夜間の出入港規制、天候にあわせて変動させることにより港内静穏度といったことからの評価をも可能とする。

3) 優先航路

海上交通安全法の航路のように優先航路の指定を経路上に行うと、その経路上の交差・合流ノードでの航行は他経路に対して優先権をもつ。

4) ある種の管制の導入

ネットワーク上を移動する船舶のうち、あるタイプの船舶については優先権をもたせ、その船舶が通過する場合、まえもって、その船の通過リンクと通過ノードを空けておく（他船を進入させない）指示をする機能である。

これは、管制対象船がある指定ノード或いはリンクに到達したときに、関連したリンクとノードへの他船の進入を停止させるものである。

5) 船舶当量の区別の指定

リンクやノードの容量を船舶当量で与えると、容量に余裕があると容量限度まで利用可能である。しかし、場合によってはリンクやノードに1隻でも他船が存在すればそのリンクやノードは進入不可能な場合が生ずることがある。そのようなリンクやノードに対しては、船舶当量を1としたり、他の別な指定を与えることによって利用中と空きによる進入可否を決定できるようにした。

6) バースの概念

ネットワークのリンクとノードを、航路部分とその結節点として説明してきたが、実際は応用が広く、港湾における滞船シミュレーションに応用でき、在来、あまり解析されていなかった港内シフトの問題と優先船に対するバースの優先使用の問題を一挙に解決する。これは、ネットワーク上のノードを同一タイプの複数バースと考える方法で、例えば、図-5.7で、●をバースノードとすると、●印のノード容量としてバース数、通過時間として接岸時間を与える。

この場合、船舶当量は隻数になることから1で与える。連続バースの場合はノード容量をバース延長(m)で与

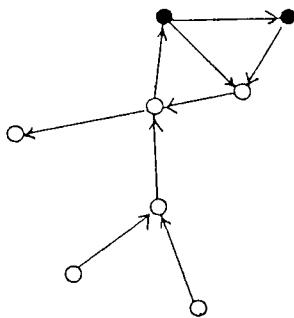


図-5.7 バースノード

え、船舶当量は（全長 L ＋余裕長）で与える。

7) 経路変更

上記、3)、4)による船舶の停止、或いは6)のフルバースによる船舶の待ち等が生じたときにそれを察知して経路を変更する機能を設けた。フルバースの場合には、泊地へ向わせて泊地で目的バースが空くまで待つ。

8) 経路のサイクル化

経路は途中でサイクルがあってもよいが始点と終点は別々である。しかし平水域のフェリーや小型船および埋立工事の土運船等シミュレーションの場から消え去らない船舶に対しては経路のサイクル化の機能も付加した。

5.4 港湾内交通への応用

5.4.1 概説

港湾計画の作成にあたって、取扱貨物量の将来推計からはじまり対象船舶・入港船舶隻数の推計、所要水際線の推計などの手順を経て港湾規模が決定される。さらに、自然条件や環境条件および船舶操船の容易性の検討を経て港湾の形態が決定される。

この場合、比較的盲点となるのが港内における航行船舶の挙動である。すなわち、船舶のフルバース待ち現象や、出入港船舶の行会い状態などの輻輳問題である。これら輻輳問題については、高度経済成長期における滞船現象の増大や船舶事故発生に伴う大きな社会不安を背景に港湾計画作成のうえで早急に解決を必要とする懸案事項となっている。

従来まで、この種の問題解決にあたっては、待ち合せ理論による予測手法が利用されてきた。しかしながら、理論的に解ける場合は制約があり、港湾活動の複雑な実態については理論解ではほとんど対応できず、所要バース数の決定などでも理想的な状態でしか応用できないのが現状である。このため、電算機利用によるシミュレーション・プログラムの開発が試みられている。

ここでは、港内交通計画への応用として苫小牧西港に

おける港内輻輳問題の予測および適正なバース数を検討するために行ったネットワーク・シミュレーションの例を示す。

5.4.2 シミュレーションの実施条件

1) 「西港」のネットワークモデル

港内輻輳状態の予測のためのシミュレーションの実施にあたって、出入港船舶の港内航行のネットワークを図-5.8のようにモデル化する。なお実際の航行船舶は港長による信号管制に従うので、500 GT以上の出入港船舶の交錯は発生しない。

係留施設については、取扱貨物の品目別構成、係留施設規模等を考慮してバース群を設定してある。図-5.8に示すようにネットワークは、17個の航行コースに大別され、それぞれのコースには1個のノードで表すバース群がある。

このためフルバース待ちの検討にあたっては、係留施設群ごとに到着船舶の船型を考慮して占有長を求め、着栈の可否を判定する連続バースの考え方を導入した。

ドルフィン構造の係留施設については、占有長をバース標準船型と仮定し1バース1船の係留に限定する。

シミュレーションの実施期間は30日間（270時間）とし、シミュレーション結果の統計量は中間の28日（672時間）の演算結果より求めることとする。

2) 演算実施ケースと入港船舶隻数およびネットワーク

「西港」における輻輳状態の予測にあたっては、将来計画として臨海部の土地利用構想に基づき、港湾取扱貨物量と入港船舶隻数の推計結果のケース1、ケース2の2ケースについて実施する。またネットワーク・シミュレーションの予測精度を検討し、将来計画における輻輳状況の判断基準に資する目的で、昭和51年の入港船舶の実績に基づいた現状ケースをケース3として実施する。それぞれのシミュレーション実施ケースについては、表-5.1に示すとおりである。これをケース別に船型別入港隻数とすると、表-5.2のとおりである。

なお、ネットワークは図-5.8である。図では理解しやすいように複数レーンで表示したが、実際は一方交通である。

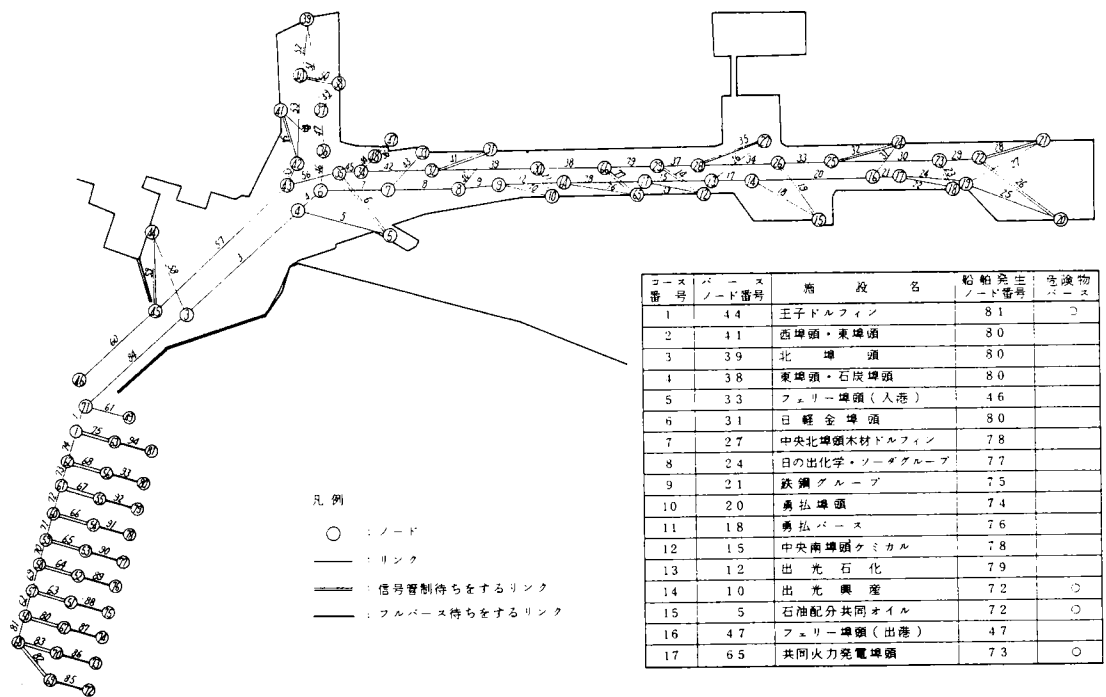


図-5.8 苫小牧西港ネットワークモデル

表-5.1 シミュレーション実施ケース

	臨海部(未利用地) 土地利用計画	港湾取扱貨物量 (千t)	入港船舶隻数 (年間)	備考
ケース 1	機械工業 食料品工業	専用貨物 44,953 公共貨物 18,630 合 計 63,583	(500GT以上) 16,719隻	
ケース 2	石油化学 食料品工業	専用貨物 54,598 公共貨物 18,630 合 計 73,228	(500GT以上) 19,800隻	
ケース 3	未 利 用	専用貨物 25,816 公共貨物 10,625 合 計 36,435	(漁船を除く) 10,492隻	昭和51年実績に基づくシミュレーションケース

表-5.2 船型別入港船舶隻数(年間)

船型 D/W		3,000	3,000	6,000	10,000	30,000	100,000	計	摘 要
試 算		未 満	6,000	10,000	30,000	100,000	以 上		
ケース 3 (51年実績) (取扱貨物 36,435千トン)	公共	12,785	948	592	83	39		14,447	漁船除く 10,492隻 (100%)
	専用	3,888	1,665	92	54	25 ⁽²⁾	⑬	5,724 ⁽¹⁸⁾	
	計	16,673 (667)	2,613 (249)	684 (65)	137 (13)	64 ⁽²⁾ (06)	⑬	20,171 ⁽¹⁸⁾	
ケース 1 (取扱貨物 63,583千トン)	公共	12,077	1,852	370	352	45		14,696	500GT 以上の船舶 16,719隻 (100%)
	専用	6,887	2,515	1,003	161	57	⑬	10,623 ⁽¹⁸⁾	
	計	18,964 (620)	4,367 (261)	1,373 (82)	513 (31)	102 (06)	⑬	25,319 ⁽¹⁸⁾	
ケース 2 (取扱貨物 73,228千トン)	公共	12,077	1,852	370	352	45		14,696	500GT 以上の船舶 19,800隻 (100%)
	専用	9,277	3,075	1,002	161	189	⑬	13,704 ⁽¹⁸⁾	
	計	21,354 (644)	4,927 (249)	1,372 (69)	513 (26)	234 (12)	⑬	28,400 ⁽¹⁸⁾	

注) (1) ○内数字はシーバースで外数。

(2) ()内は漁船、シーバースを除く船型構成比

(3) G/T → D/W の 算率(昭和51年実績)

3,000 G/T 未満 2.5 } 使用
3,000 G/T 以上 1.5 }

3) 船舶の発生の時間変動

船舶の発生分布の時間変動は、昭和52年8月における実態調査結果によると、図-5.9の実線であった。こ

れをもとに、時間帯別変動を考慮し、時間帯別の平均値を図-5.9の破線に示すような値で与え、次のように仮定した。

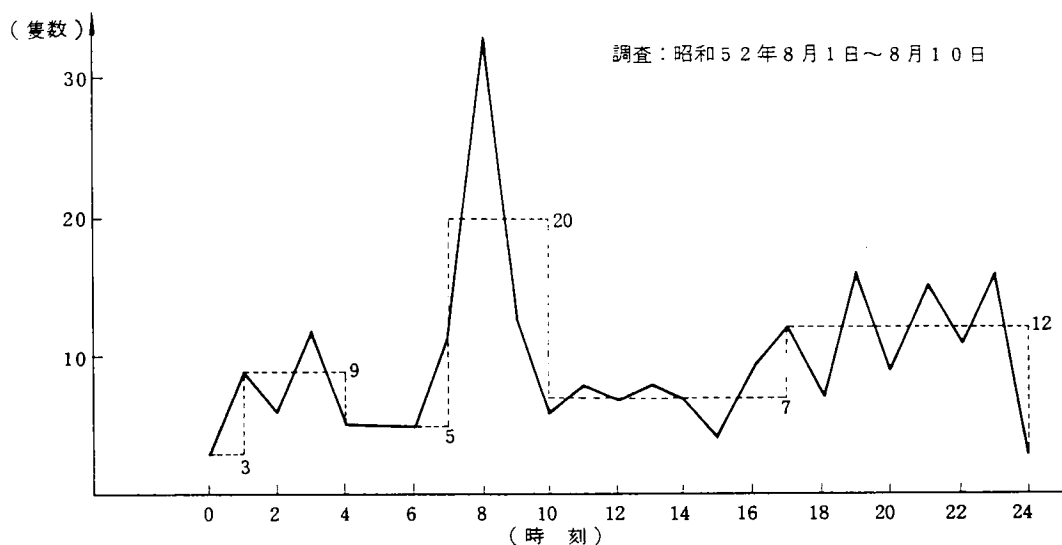


図-5.9 時間帯別船舶発生頻度

① 一般船…………ポアソン分布に従う。(平均値は する。

図－5.9の破線)

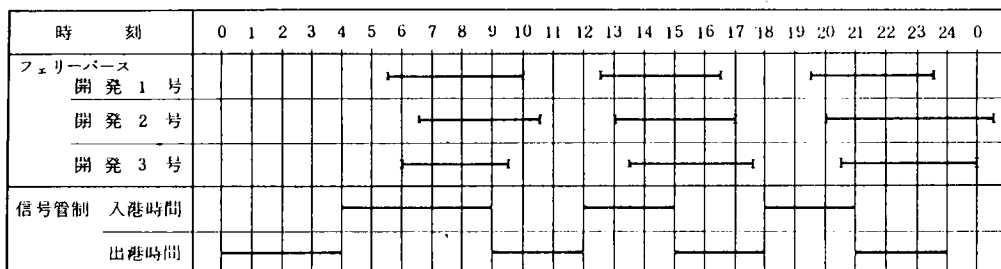
5) 船舶の出入港規制条件

② フェリーポート…………図－5.10に示すフェリー
ー就航ダイヤに従う。

シミュレーションの実施にあたっては、苫小牧におけ
る規制の実態を考慮し、次のような出入港規制を設定し
た。

4) 係留時間・在港時間の仮定

「西港」における実績を参考に表－5.3のごとく仮定



図－5.10 フェリー就航ダイヤおよび信号管制時間帯の仮定

表－5.3 在港時間分布型と平均在港時間

コース	埠 頭 名	ケース 1		ケース 2		ケース 3	
		平均値(h)	分 布 形	平均値(h)	分 布 形	平均値(h)	分 布 形
①	王 子 ド ル フ ィ ン	10	アーラン3	10	アーラン3	—	—
2	西 ぶ 頭 ・ 南 ぶ 頭	29	アーラン2	29	アーラン2	29	アーラン2
3	北 ぶ 頭	18	アーラン2	18	アーラン2	18	アーラン2
4	東 ぶ 頭 ・ 石 炭 ぶ 頭	17	アーラン2	17	アーラン2	17	アーラン2
5	フ ェ リ ー ぶ 頭 (入港)	(ダイヤによる)					
6	日 軽 金	26	アーラン2	26	アーラン2	26	アーラン2
7	中央北ぶ頭, 木材ドルフィン	35	アーラン3	35	アーラン3	35	アーラン3
8	日の出化学, ソーダグループ	42	アーラン2	42	アーラン2	42	アーラン2
9	鉄 鋼 グ ル ー プ	20	アーラン2	20	アーラン2	—	—
10	勇 弘 ぶ 頭	20	アーラン2	20	アーラン2	20	アーラン2
11	勇 弘 パ ー ス	18	アーラン2	18	アーラン3	—	—
12	中央南ぶ頭, 苫小牧クミカル	21	アーラン2	21	アーラン2	21	アーラン2
⑬	出 光 石 化	17	アーラン3	17	アーラン3	—	—
⑭	出 光 興 産	9	アーラン3	9	アーラン3	9	アーラン3
⑮	石油配分基地共同オイルターミナル	10	アーラン3	10	アーラン3	10	アーラン3
16	フ ェ リ ー ぶ 頭 (出港)	(ダイヤによる)					
17	共 同 発 電	13	アーラン3	13	アーラン3	13	アーラン3

注) ○印は危険物取扱施設

(1) 夜間入港規制

- a. 危険物積載船について夜間（夕方 19 時～翌朝 6 時）の入港を禁止する。
- b. 危険物積載船は、着岸係留施設で判別する。
- c. 危険物積載船の着岸係留施設は表－5.3 に○印で示す施設を考える。

(2) 信号管制（図－5.10）

- a. 「西港」における信号管制の実態を考慮し、出港信号と入港信号を交互に繰返す規制を行う。
- b. 信号管制は、シミュレーションで設定した入港船の発生頻度を勘案して、最低 3 時間の同一管制が継続する時間帯で簡易化する。
- c. フェリーは信号管制による規制をうけないように、フェリー就航ダイヤを勘案した信号管制とする。

6) 船舶の航行条件

(1) 港内航行速度

既応調査を参考に、船種別・船型別に港内航行速度を表－5.4 のように仮定する。

(2) 離着棧に要する操船時間

既応調査の結果を参考に、船舶航行の安全のために離着棧に要する操船時間を考慮し、次のような規制を考える。

- a. 同一バース群に連続して 2 隻以上の着棧船舶があるとき、後続船は先行船の着棧のための操船行動時間（12 分間）だけ、施設前面で着棧を待つ。
- b. 離棧船舶があるとき、その施設前面を航行しようとする他の船舶の航行を離棧船舶の操船行動時間（12 分間とした）だけ禁止する。

(3) 先行船との安全距離の確保

港内を航行するとき、5 L（L：船長）の距離を先行船との間に確保する。

(4) 追越しの禁止

港内を航行するとき、先行船を追越さない。

5.4.3 演算結果と評価

1) 演算実施条件の検定

(1) 入港船舶隻数

シミュレーション実施期間に発生した船舶隻数は、係留施設別に表－5.5 (1)～表－5.5 (8) である。これによればケース 1 では 1,298 隻、ケース 2 では 1,596 隻、ケース 3 では 935 隻となっており、到着隻数の船種・船型別構成比率は入力条件にほぼ一致している。

(2) 接岸時間

係留施設別の接岸時間については表－5.6 のとおりとなっており、入力条件にほぼ等しい。

2) 演算結果と評価

(1) 演算結果の評価方法と待ち時間の定義

ネットワーク・シミュレーションを利用し、船舶を発生させて入港～着棧～荷役・積込～出港～消滅に至る船舶交通によって発生する待ち現象をもとに航行船舶の輻輳度を検討するにあたり、次の 2 つの方法からアプローチした。

イ. 航行船舶に着目し、入港から出港に至るまでの間に航行船舶に生ずる各種の規制による待ち時間や先行船との安全間隔を確保するための待ち時間から輻輳状態の概要を検討する（航行コース別、係留施設別の検討）。

ロ. 港内水域に着目し、船舶交通量の増加に伴う港内航行船舶の待ち現象の発生状況から、特に輻輳する地点の確認を行い船舶交通の安全性について検討する（港内航路のリンク、ノード別の検討）。

検討にあたっては船舶の動態に着目し、各種の待ち時間を次のように定義した。

① フルバース待ち……到着船舶が着棧を予定する施設にすでに先行船舶が着棧しており、新たに着棧する余地がない場合に生ずる。

② 夜間入港規制待ち……危険物を積載した船舶（主に石油製品）の発生時刻が夜間（19 時～翌

表－5.4 船種船型別港内航行速度

船 種	船 型	入 港 速 度	出 港 速 度
一般商船	5 0 0 ～1 0,0 0 0 D/W	5 ノット（2.6 m/sec）	6 ノット（3.1 m/sec）
	1 0,0 0 0 ～2 0,0 0 0 D/W	4.5 ノット（2.3 m/sec）	5.5 ノット（2.8 m/sec）
	2 0,0 0 0 D/W ～	4 ノット（2.1 m/sec）	5 ノット（2.6 m/sec）
フェリー	3.0 0 0 ～1 0,0 0 0 G.T	6 ノット（3.1 m/sec）	6 ノット（3.1 m/sec）

表-5.5(1) 施設別演算対象船舶(ケース1)

到着船の船型及び船種																			
コース	施設名	1,000.0%未満		1,000.0%～3,000.0%未満		3,000.0%～10,000.0%未満		10,000.0%～30,000.0%未満		30,000.0%以上		危険物積載給10,000%未満		危険物積載給10,000%以上		フェリーボート		合計隻数	
		隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%		
1	王子ドルフィン	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	21	100	0	0.0	0	0.0	21	
2	五増頭・司増頭	5	9.1	22	100	9	16.4	19	34.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	55	
3	北増頭	60	57.1	32	30.5	13	12.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	105	
4	東増頭・石炭増頭	0	0.0	66	47.8	72	52.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	138	
5	フェリー増頭(入港)	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	252	100	252	
6	日軽金増頭	6	31.6	6	31.6	6	31.6	1	5.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	19	
7	中央北増頭・木材ドルフィン	12	18.7	28	43.8	20	31.2	4	6.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	64	
8	日の出化学・ソーダグループ	6	18.2	20	60.6	3	9.1	4	12.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	33	
9	鉄鋼グループ	3	6.4	39	83.0	5	10.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	47	
10	勇弘増頭	34	26.8	39	30.7	44	34.6	8	6.3	2	1.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	127	
11	勇弘バース	7	11.7	33	55.0	16	26.7	4	6.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	60	
12	中央南増頭・ケミカル	8	16.7	33	68.8	7	14.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	48	
13	出光石化	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	
14	出光興産	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	169	99.4	1	0.6	0	0.0	170	
15	石油配分・共同オイル	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	136	100	0	0.0	0	0.0	136	
16	フェリー増頭(出港)	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	253	100	253	
17	共同火力発電増頭	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	23	100	0	0.0	0	0.0	23	
	発生隻数(28日間)	141	10.9	318	24.5	195	15.0	40	3.0	2	0.2	349	26.9	1	0.1	252	19.4	1,298(100)	
	入力条件(1年間)	2,073	12.3	3,923	23.5	2,917	17.4	513	3.0	79	0.4	3,906	23.4	23	0.1	3,285	19.6	16,719(100)	

表-5.5(2) 施設別演算対象船舶(ケース2)

到着船舶の船型及び船種																			
コース	施設名	1,000 %未満		1,000%～30,000%未満		30,000%～100,000%未満		100,000%～300,000%未満		300,000%以上		危険物積載船10,000%未満		危険物積載船10,000%以上		フェリーボート		合計隻数	
		隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%		
1	王子ドルフィン	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	21	100	0	0.0	0	0.0	21	
2	西埠頭・南埠頭	5	9.1	22	40.0	9	16.4	19	34.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	55	
3	北埠頭	59	56.7	32	30.8	13	12.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	104	
4	東埠頭・石炭埠頭	0	0.0	66	47.8	72	52.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	138	
5	フェリー埠頭(入港)	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	252	100	252	
6	日経金埠頭	6	31.6	6	31.6	6	31.6	1	5.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	19	
7	中央北埠頭・木材ドルフィン	12	18.7	28	43.8	20	31.2	4	6.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	64	
8	日の出化学・ソーダグループ	6	18.2	20	60.6	3	9.1	4	12.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	33	
9	鉄鋼グループ	3	6.4	39	83.0	5	10.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	47	
10	勇弘埠頭	34	26.8	39	30.7	44	34.6	8	6.3	2	1.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	127	
11	勇弘バース	22	18.8	58	49.6	26	22.2	10	8.5	1	0.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0	117	
12	中央南埠頭・ケミカル	8	16.7	33	68.8	7	14.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	48	
13		0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	
14	出光興産	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	394	95.9	17	4.1	0	0.0	411	
15	石油配分・共同オイル	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	136	100	0	0.0	0	0.0	136	
16	フェリー埠頭(出港)	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	253	100	253	
17	共同火力発電	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	23	100	0	0.0	0	0.0	23	
	発生隻数(28日間)	155	97	343	215	205	128	46	29	3	0.2	574	360	17	1.1	252	158	1596(100)	
	入刀条件(1年間)	1,987	100	3,754	190	2,862	145	513	25	79	0.4	7,165	362	155	0.8	2,286	166	19,800(100)	

表-5.5(3) 施設別演算対象船舶(ケース3)

到着船舶の船型及び船種																			
コース	施設名	1,000 %未満		1,000%～ 3,000 %未満		3,000%～ 10,000 %未満		10,000 %～ 30,000 %未満		30,000 %以上		危険物積載船 10,000 %未満		危険物積載船 10,000 %以上		フェリーボート		合計隻数	
		隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%	隻数	%		
1		0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	
2	西埠頭・南埠頭	85	63.4	33	24.6	13	9.7	3	2.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	134
3	北埠頭	32	55.2	25	43.1	1	1.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	58
4	東埠頭・石炭埠頭	73	62.4	14	12.0	29	24.8	1	0.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	117
5	フェリー埠頭（入港）	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	223
6	日経金埠頭	18	94.7	1	5.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	19
7	中央北埠頭・木材ドルフィン	26	56.5	3	6.5	15	32.6	2	4.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	46
8	日の出化学・ソーダグループ	12	80.0	1	6.7	0	0.0	2	13.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	15
9		0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0
10	勇払埠頭	6	60.0	4	40.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	10
11		0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0
12	中央南埠頭・ケミカル	58	66.7	21	24.1	6	6.9	2	2.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	87
13		0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0
14	出光興産	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	124	100	0	0.0	0	0.0	0	124
15	石油配分・共同オイル	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	86	100	0	0.0	0	0.0	0	86
16	フェリー埠頭（出港）	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	223	100	223	
17	共同火力発電	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	17	100	0	0.0	0	0.0	0	17
	発生隻数（28日間）	310	33.0	102	10.8	64	6.8	10	1.2	0	0.0	227	24.3	0	0.0	223	23.9	935	100
	入力条件（1年間）	3745	35.7	1187	11.3	772	7.4	131	1.2	0	0.0	2692	25.7	21	0.2	1923	18.4	10492	100

表-5.6 接岸時間の入力条件と演算結果

コース /6	施 設 名	ケ ー ス 1			ケ ー ス 2			ケ ー ス 3 (現 状)			備 考
		入 力 条 件		演 算 結 果	入 力 条 件		演 算 結 果	入 力 条 件		演 算 結 果	
		分 布 形	平 均 値(h)	平 均 値(h)	分 布 形	平 均 値(h)	平 均 値(h)	分 布 形	平 均 値(h)	平 均 値(h)	
1	王 子 ド ル フ ィ ン	ア ー ラ ン	1 0	9.1	ア ー ラ ン	1 0	8.7	—	—	—	現状では未整備
2	西 埠 頭 ・ 東 埠 頭	ア ー ラ ン	2 9	2 4.7	ア ー ラ ン	2 9	2 4.7	ア ー ラ ン	2 9	2 6.1	
3	北 埠 頭	ア ー ラ ン	1 8	1 8.8	ア ー ラ ン	1 8	1 7.0	ア ー ラ ン	1 8	1 7.1	
4	東 埠 頭 ・ 石 炭 埠 頭	ア ー ラ ン	1 7	1 6.4	ア ー ラ ン	1 7	1 6.4	ア ー ラ ン	1 7	1 6.2	
5	フ ェ リ ー 埠 頭 (入 港)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ダイヤ表による
6	日 軽 金 埠 頭	ア ー ラ ン	2 6	2 8.6	ア ー ラ ン	2 6	2 8.6	ア ー ラ ン	2 6	2 8.6	
7	中央北埠頭・木材ドルフィン	ア ー ラ ン	3 5	3 5.3	ア ー ラ ン	3 5	3 5.3	ア ー ラ ン	3 5	3 4.6	
8	日の出化学・ソーダグループ	ア ー ラ ン	4 2	4 5.1	ア ー ラ ン	4 2	4 5.1	ア ー ラ ン	4 2	5 5.9	
9	鉄 鋼 グ ル ー プ	ア ー ラ ン	2 0	1 8.4	ア ー ラ ン	2 0	1 9.5	—	—	—	現状では未整備
10	勇 弘 埠 頭	ア ー ラ ン	2 0	1 9.6	ア ー ラ ン	2 0	1 9.3	ア ー ラ ン	2 0	2 1.9	
11	勇 弘 バ ー ス	ア ー ラ ン	1 8	1 6.0	ア ー ラ ン	1 8	1 8.6	—	—	—	現状では未整備
12	中央南埠頭・ケミカル	ア ー ラ ン	2 1	2 1.9	ア ー ラ ン	2 1	2 1.9	ア ー ラ ン	2 1	2 1.2	
13	出 光 石 化	ア ー ラ ン	1 7	1 5.4	—	—	—	—	—	—	ケース2 演算対象外 ケース3 現状では未整備
14	出 光 興 産	ア ー ラ ン	9	8.4	ア ー ラ ン	9	8.4	ア ー ラ ン	9	8.3	
15	石油配分・共同オイル	ア ー ラ ン	1 0	1 0.3	ア ー ラ ン	1 0	1 0.4	ア ー ラ ン	1 0	1 0.0	
16	フ ェ リ ー 埠 頭 (出 港)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ダイヤ表による
17	共 同 火 力 発 電 埠 頭	ア ー ラ ン	1 3	1 5.0	ア ー ラ ン	1 3	1 5.0	ア ー ラ ン	1 3	1 4.4	

朝6時)の場合、翌朝の夜間入港規制が解除されるまで待機するために生ずる。

- ③ 入港信号・出港信号待ち……出入港船舶が管制解除まで待機する場合に発生する。
- ④ 航路容量待ち……①～③以外で、船舶が港内を航行するときに発生する待ちの総称で次のような現象が考えられる。
 - (i) 出入港船舶が港内を航行するときは、安全間隔を確保するために発生する。
 - (ii) 入港船舶が連続して同一バース群に着岸するとき、先行船の操船行動のために後続船が施設前面で待つことにより発生する。
 - (iii) 離岸船舶があるとき、その施設前面が閉塞されるために発生する。
 - (iv) 出港船舶が港内で合流するとき発生する。
 - (v) その他、港内航行速度の相異等により発生する。

(2) 評価

イ・演算実施ケース別船舶発生隻数

演算実施期間における出入港船舶隻数の変動は、図-5.11(1)～図-5.11(3)に示すとおりである。出入港船舶隻数の最大値はケース1で130隻、ケース2で150隻、現状ケース(昭和51年度)のケース3で100隻となっている。

ロ・係留施設別船舶待ち時間の検討

シミュレーション演算結果から係留施設別(航行コース別)到着船舶の待ち時間は、表-5.7(1)～表-5.7(3)に示すとおりである。到着船舶1隻当りの平均待ち時間については、ケース1およびケース2がともに3.7～3.8時間であるのに対し、昭和51年の入港実績に対応したケース3では3.0時間となっている。

また、到着船舶に関する総待ち時間の構成は次のとおりである。

ケース1では、総待ち時間4,939時間のうち入港管制待ちおよび夜間入港規制待ち(55.0%)、出港管制待ち(24.8%)、フルバース待ち(19.1%)の順となっている。

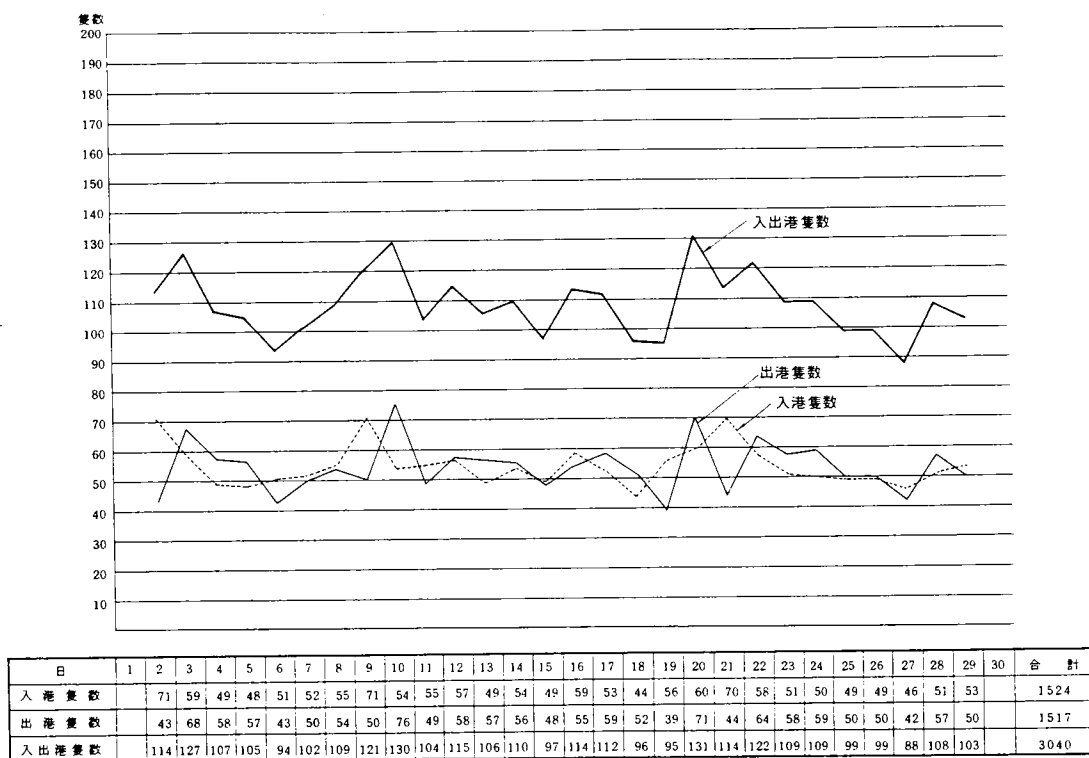
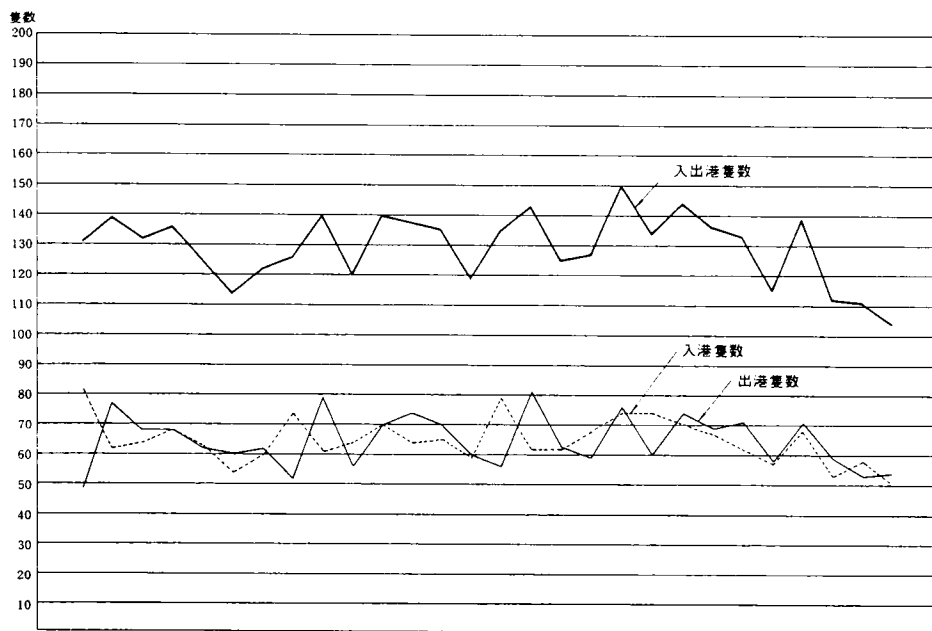
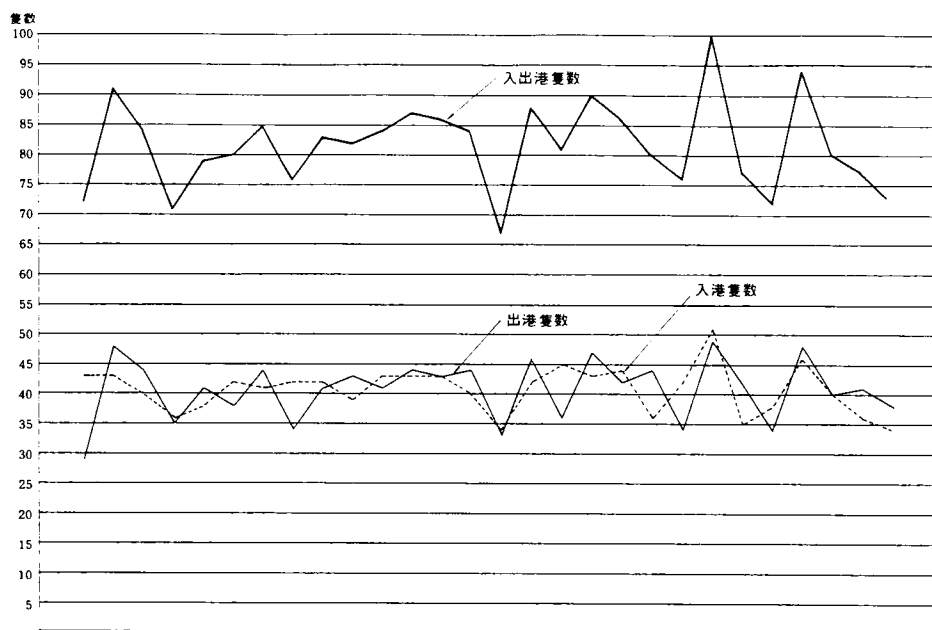


図-5.11(1) 入出港船舶隻数の変動(ケース1)



日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	合 計
入 港 隻 数	82	62	64	68	63	54	60	74	61	64	70	64	65	59	79	62	62	68	74	74	70	67	62	57	68	53	58	50		1815	
出 港 隻 数	49	77	68	68	62	60	62	52	79	56	70	74	70	60	56	81	63	59	76	60	74	69	71	58	71	59	53	54		1811	
入 出 港 隻 数	131	139	132	136	125	114	122	126	140	120	140	138	135	119	135	143	125	127	150	134	144	136	133	115	139	112	111	104		3625	

図－5.11 (2) 入出港船舶隻数の変動（ケース 2）



日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	合 計
入 港 隻 数	43	43	40	36	38	42	41	42	42	39	43	43	43	40	34	42	45	43	44	36	42	51	35	38	46	40	36	34		1141	
出 港 隻 数	29	48	44	35	41	38	44	34	41	43	41	44	43	44	33	46	36	47	42	44	34	49	42	34	48	40	41	38		1143	
入 出 港 隻 数	72	91	84	71	79	80	85	76	83	82	84	87	86	84	67	88	81	90	86	80	76	100	77	72	94	80	77	72		2284	

図－5.11 (3) 入出港船舶隻数の変動（ケース 3）

表-5.7 (1) 係留施設別船舶待ち時間(ケース1)

(凡例) 総待ち時間: 全平均(h)
待ち量数: 待ち平均(h)

コース No	施設名	航行 隻数	航路容量待ち		フルバース待ち		(入港管制待ち) 夜間規制待ち		出港管制待ち		待ち時間計(h) 航行隻数平均(h)
1	王子ドルフィン	21	0036 7	0002 0005	93996 9	4476 10444	66568 17	3170 3916	24332 8	1159 3041	184932 8806
2	西ふ頭・南ふ頭	55	0509 19	0009 0027	0 0	0 0	101488 37	1845 2743	56818 27	1033 2104	158815 2888
3	北ふ頭	105	7275 105	0069 0069	665162 45	6335 14781	267655 84	2549 3186	126211 61	1202 2069	1066303 10155
4	東ふ頭・石炭ふ頭	138	6534 134	0047 0049	82555 13	0598 6350	264288 84	1915 3146	130415 64	0945 2038	483792 3506
5	フェリーふ頭(入港)	252	0384 245	0002 0002	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0384 0002
6	日経金	19	0938 18	0049 0052	0 0	0 0	25435 15	1339 1696	13533 7	0712 1933	39906 2100
7	中央北ふ頭 木材ドルフィン	64	2781 61	0043 0046	27371 5	0428 5474	161515 54	2524 2991	65084 33	1017 1972	256751 4012
8	日の出化学 ソーダグループ	33	1784 30	0054 0059	0 0	0 0	60799 25	1842 2432	48312 19	1464 2543	110895 3360
9	鉄鋼グループ	47	2149 45	0046 0048	0 0	0 0	98375 29	2093 3392	64874 28	1380 2317	165398 3519
10	勇払ふ頭	127	7809 127	0061 0061	78842 15	0589 4989	308221 93	2427 3314	201864 81	1589 2492	592736 4667
11	勇払バース	60	2616 56	0044 0047	0 0	0 0	153133 41	2552 3735	100743 40	1679 2519	256492 4275
12	中央南ふ頭 苫小牧ケミカル	48	1393 40	0029 0035	0 0	0 0	105125 32	2190 3285	38589 21	0804 1838	145107 4275
13	出光石化	0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
14	出光興産	170	9354 169	0055 0055	0 0	0 0	575163 122	3383 4714	172238 85	1013 2026	756755 4452
15	石油配分基地 共同オイルターミナル	136	5849 134	0043 0044	0 0	0 0	480101 108	3530 4445	152547 71	1122 2149	638497 4695
16	フェリーふ頭(出港)	253	2198 245	0009 0009	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	2198 0009
17	共同発電	23	0841 23	0037 0037	0 0	0 0	47850 17	2080 2815	30858 12	1342 2571	79549 3459
合 計		1298	52450 1458	0034 0036	943925 87	0609 10850	2715715 758	1751 3583	1226417 557	0791 2202	4938507 3804
総待ち時間構成比			1.06%		19.11%		54.99%		24.83%		100%

全平均=総待ち時間/航行隻数
待ち平均=総待ち時間/待ち量数

表-5.7 (2) 係留施設別船舶待ち時間(ケース2)

(凡例) 総待ち時間: 全平均(h)
待ち量数: 待ち平均(h)

コース No	施設名	航行 隻数	航路容量待ち		フルバース待ち		(入港管制待ち) 夜間規制待ち		出港管制待ち		待ち時間計(h) 航行隻数平均(h)
1	王子ドルフィン	21	0052 16	0002 0003	105223 11	5011 9566	67341 17	3207 3961	26329 12	1254 2194	198945 9474
2	西ふ頭・南ふ頭	55	0597 50	0011 0012	0 0	0 0	101488 37	1845 2743	69960 31	1272 2257	172045 3128
3	北ふ頭	104	6780 104	0065 0065	310887 34	2989 9144	226823 75	2181 3024	132988 58	1279 2293	677478 6514
4	東ふ頭・石炭ふ頭	138	6416 134	0046 0048	84549 13	0613 6504	262293 84	1901 3123	123660 57	0896 2169	476918 3456
5	フェリーふ頭(入港)	252	0368 242	0001 0002	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0368 0000
6	日経金	19	0884 19	0047 0047	2329 1	0123 2329	27964 16	1472 1748	20056 9	1056 2228	51233 2696
7	中央北ふ頭 木材ドルフィン	64	5839 63	0091 0093	27677 5	0432 5535	161209 54	2519 2985	72662 35	1135 2076	267387 4178
8	日の出化学 ソーダグループ	33	1647 30	0050 0055	0 0	0 0	60799 25	1842 2432	44309 18	1345 2466	106838 3237
9	鉄鋼グループ	47	2533 47	0054 0054	0 0	0 0	98375 29	2093 3392	48421 26	1030 1862	149329 3177
10	勇払ふ頭	127	11579 121	0091 0096	77301 14	0609 5522	310944 94	2448 3308	209076 79	1646 2647	608900 4794
11	勇払バース	117	5846 114	0050 0051	0 0	0 0	280802 81	2400 3467	131357 61	1123 2153	418005 3573
12	中央南ふ頭 苫小牧ケミカル	48	2370 46	0049 0052	0 0	0 0	105125 32	2190 3285	51810 22	1079 2355	159305 3319
13	出光石化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	出光興産	411	47774 411	0116 0116	0 0	0 0	1324246 302	3222 4385	427759 199	1041 2150	1799779 4379
15	石油配分基地 共同オイルターミナル	136	4997 131	0037 0038	9532 3	0070 3177	494569 108	3637 4579	164353 74	1208 2221	673451 4952
16	フェリーふ頭(出港)	253	2486 243	0010 0010	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	2486 0001
17	共同発電	23	1750 23	0076 0076	0 0	0 0	47850 17	2080 2815	29859 12	1298 2488	79459 3455
合 計		1596	101920 1794	0055 0057	617498 81	0334 7623	3569828 971	1932 3676	1552680 693	0840 1241	5841926 3663
総待ち時間構成比			1.74%		10.57%		61.10%		26.58%		100%

全平均=総待ち時間/航行隻数
待ち平均=総待ち時間/待ち量数

表-5.7 (3) 係留施設別船舶待ち時間(ケース3)

(凡例)

総待ち時間	全平均(h)
待ち隻数	待ち平均(h)

コース No	施設名	航行 隻数	航路容量待ち		フルバース待ち		(入港管制待ち 夜間規制待ち)		出港管制待ち		待ち時間計(h) 航行隻数平均(h)
1	王子ドルフィン	—	—		—		—		—		—
2	西ふ頭・南ふ頭	134	4.444 133	0.033 0.033	0 0	0 0	240.786 75	1.797 3.210	144.968 69	1.082 2.101	390.198 2.912
3	北ふ頭	58	4.737 56	0.082 0.085	0 0	0 0	117.062 41	2.018 2.855	68.292 30	1.177 2.276	190.091 6.553
4	東ふ頭・石炭ふ頭	117	7.589 116	0.065 0.065	0 0	0 0	253.220 85	2.164 2.979	142.145 64	1.215 2.221	402.954 3.444
5	フェリーふ頭(入港)	223	8.192 204	0.036 0.040	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	8.192 0.037
6	日 軽 金	19	1.612 19	0.085 0.085	0 0	0 0	49.324 16	2.596 3.083	15.855 10	0.834 1.585	66.791 3.515
7	中央北ふ頭 木材ドルフィン	46	1.763 45	0.038 0.039	0 0	0 0	100.350 31	2.182 3.237	51.501 25	1.120 2.060	153.614 3.339
8	日の出化学 ソーダグループ	15	0.732 15	0.049 0.049	0 0	0 0	40.242 11	2.683 3.658	16.234 8	1.082 2.029	57.208 3.814
9	鉄鋼グループ	—	—		—		—		—		—
10	勇 弘 ふ 頭	10	0.305 10	0.031 0.031	490.80 2	4.908 24.540	26.320 6	2.632 4.387	10.491 5	1.049 2.098	86.196 8.620
11	勇 弘 パ ー ス	—	—		—		—		—		—
12	中央南ふ頭 苫小牧ケミカル	87	5.107 84	0.059 0.061	3.157 3	0.036 1.052	149.508 56	1.718 2.670	12.712 51	1.399 2.387	279.484 3.212
13	出 光 石 化	—	—		—		—		—		—
14	出 光 興 産	124	10.768 123	0.087 0.088	0 0	0 0	472.033 95	3.807 4.969	145.477 67	1.173 2.171	628.278 5.067
15	石油配分基地 共同オイルターミナル	86	6.729 86	0.078 0.078	380.91 11	0.443 3.463	300.221 68	3.491 4.415	112.257 45	1.305 2.495	457.298 5.317
16	フェリーふ頭(出港)	223	8.428 218	0.038 0.039	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	8.428 0.038
17	共 同 発 電	17	1.580 17	0.093 0.093	0 0	0 0	26.186 11	1.540 2.381	24.073 10	1.416 2.407	51.839 3.049
合 計		935	61.986 1126	0.054 0.055	90.328 16	0.078 5.646	1775.253 495	1.532 3.586	853.004 384	0.736 2.221	2780.571 2.970
総待ち時間構成比			2.23%		3.25%		63.84%		30.68%		100%

全平均=総待ち時間/航行隻数
待ち平均=総待ち時間/待ち隻数

ケース2では、総待ち時間5,842時間のうち入港管制待ちおよび夜間入港規制待ち(61.1%)、出港管制待ち(26.6%)、フルバース待ち(10.6%)の順となっている。

ケース3(現状ケース)においては、総待ち時間2,781時間のうち入港管制待ちおよび夜間入港規制待ち(63.8%)、出港管制待ち(30.7%)、フルバース待ち(3.25%)の順となっている。

各種の待ち時間をシミュレーション実施ケース別に比較すれば、表-5.8のとおりとなる。

将来計画に対応するケース1およびケース2については、現状ケースに比較しフルバース待ち時間、入港管制待ち時間、夜間規制待ち時間が増大している。表-5.9に示す五大港湾におけるフルバース待ち時間の記録や西港地区における港湾利用者の要請から判断して港湾のサービス水準として特に問題となる輻輳状態ではないと思われる。

ハ. 港内航路別待ち時間の検討

イ) リンク、ノードで発生する待ち現象について
「西港」の港内航路別にみた輻輳状態について

は、図-5.8に示すネットワーク(リンク・ノード情報)より検討する。各リンクおよびノードにおける交通量、待ち隻数および待ち時間については、表-5.10(1)~表-5.10(3)に示すとおりである。これらリンクおよびノードにおいて発生する待ち時間には次のものが考えられる。

① リンクで発生する待ち現象

リンクにおける待ち現象は、一般にリンクが先行船舶の存在、または各種管制により閉塞されており、後続船の進入を阻害するときに発生する。今回のシミュレーションにおいては次のような原因による待ち現象が考えられる。

ア. 種々の管制のためのリンク閉塞により発生する待ち現象

- (i) フルバースによるリンク閉塞……No.85, No.86など。
- (ii) 夜間入港規制によるリンク閉塞……No.75, No.82など。
- (iii) 入港管制によるリンク閉塞……No.82, No.83など。

表-5.8 シミュレーションケース別待ち時間

ケース	入港隻数	航路容量待ち	フルバース待ち	入港管制待ち (受問時間待ち)	出港管制待ち	待ち時間(h)	
						待ち時間(h) 航行隻数平均(h)	待ち時間(h) 全平均(h)
ケース1	1298	32450 0034 0036	943925 0609 10850	2715715 258 3583	1751 1226417 557	0791 4938507 3804	
ケース2	1596	101920 1794 0057	617498 0334 81	3569828 376 971	1932 1552680 393	0840 5841926 1241	
ケース3	935	61986 1128 0055	90328 0078 16	1775253 3586 495	1532 853004 384	0736 2780571 2970	

(凡例)

総待ち時間(h)
待ち隻数

全平均(h)
待ち時間(h)

表-5.9 主要五港における暦年滞船状況表

港名	期年	滞船船隻数 (A)	バース待ち船隻数 (B)		バース待ち時間(C)		平均待ち時間 (C/B)	入港船舶一貫 平均待ち時間 (C/A)	備考
			バース待ち船隻数 (B)	バース待ち時間 (C)	バース待ち時間 (C)	バース待ち時間 (C)			
主要五港	昭和36年11月	(3393)	(733)	216	(64839)	885	191	()は月平均	
	12月	(3541)	(750)	212	(70694)	942	200		
	昭和37年	41207(3434)	4824(402)	117	173141(14428)	360	42		
	38	44560(3713)	4588(382)	103	125293(10441)	272	28		
	39	46697(3875)	5706(476)	122	133565(11130)	234	29		
	40	44133(3678)	5051(421)	115	119047(9921)	236	27		
	41	48112(4009)	5001(417)	104	175253(14604)	351	36		
	42	55941(4662)	7210(601)	129	329112(27426)	457	59		
	43	61101(5083)	7760(647)	127	261654(21805)	337	43		
	44	52789(5232)	6527(544)	104	259667(21639)	398	41		
	45	64822(5402)	6706(559)	103	265664(22222)	398	42		
	46	62543(5212)	4767(397)	76	274330(14528)	366	28		
注) 五港とは東京、横浜、名古屋、神戸、大阪の5港である。	47	66019(5502)	5079(423)	77	204358(17030)	402	31		
	48	67072(5589)	3808(317)	57	183240(15270)	482	27		
	49	59837(4986)	4237(353)	71	235622(19635)	556	39		
	50	57780(4815)	1584(132)	27	41064(3422)	259	07		

資料: 「港湾要綱」昭和37年度計画(51-55)
52.3 運輸省港湾計画課

表-5.10 (1) 港内輻輳情報(ケース1)

リンク情報

ノード情報

番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均
1	1025	0	0	0	36	253	0	0	0	71	582	0	0	0	21	1257	0	0	0	71	1277	0	0	0
2	0	0	0	0	37	367	0000	1	0006	72	692	0	0	0	22	0	0	0	0	72	0	0	0	0
3	1257	0.001	77	0.011	38	388	0009	89	0038	73	692	0	0	0	23	1277	0	0	0	73	0	0	0	0
4	1123	0	0	0	39	551	0000	5	0007	74	1005	0	0	0	24	1257	0	0	0	74	0	0	0	0
5	134	0	0	0	40	19	0	0	0	75	20	3328	17	3916	25	304	0	0	0	75	0	0	0	0
6	134	1123	69	2181	41	19	0712	7	1933	76	23	0	0	0	26	134	0	0	0	76	0	0	0	0
7	829	0	0	0	42	570	0000	30	0008	77	21	1422	11	2714	27	62	0	0	0	77	0	0	0	0
8	577	0	0	0	43	252	0	0	0	78	368	0	0	0	28	577	0	0	0	78	0	0	0	0
9	558	0	0	0	44	253	0	0	0	79	367	0	0	0	29	558	0	0	0	79	0	0	0	0
10	167	0	0	0	45	822	0	0	0	80	124	2443	92	3293	30	167	0	0	0	80	0	0	0	0
11	163	1016	82	2020	46	294	0	0	0	81	324	0	0	0	31	368	0	0	0	81	0	0	0	0
12	391	0	0	0	47	240	0	0	0	82	297	3371	223	4489	32	391	0	0	0	82	0	0	0	0
13	0	0	0	0	48	54	0	0	0	83	23	2080	17	2815	33	0	0	0	0	83	0	0	0	0
14	0	0	0	0	49	138	0	0	0	84	1277	0002	110	0024	34	0	0	0	0	84	0	0	0	0
15	368	0	0	0	50	135	0935	62	2037	85	299	0	0	0	35	368	0	0	0	85	0	0	0	0
16	62	0	0	0	51	102	0	0	0	86	23	0	0	0	36	62	0	0	0	86	0	0	0	0
17	306	0	0	0	52	103	1217	59	2124	87	124	0604	15	4989	37	306	0	0	0	87	0	0	0	0
18	48	0	0	0	53	238	0	9	0007	88	45	0	0	0	38	48	0	0	0	88	0	0	0	0
19	47	0795	20	1867	54	50	1114	26	2142	89	57	0	0	0	39	47	0795	20	1867	89	0	0	0	0
20	258	0	0	0	55	288	0000	17	0005	90	31	0	0	0	40	258	0	0	0	90	0	0	0	0
21	226	0	0	0	56	956	0	0	0	91	110	0249	5	5474	41	226	0	0	0	91	0	0	0	0
22	57	0	0	0	57	1245	0021	456	0056	92	0	0	0	0	42	57	0	0	0	92	0	0	0	0
23	58	1678	38	2561	58	20	0	0	0	93	310	2380	55	1341	43	58	1678	38	2561	93	0	0	0	0
24	169	0	0	0	59	20	1195	7	3415	94	20	4700	9	1041	44	169	0	0	0	94	0	0	0	0
25	125	0	0	0	60	1265	0	0	0						45	125	0	0	0					
26	123	1549	78	2442	61	252	0	0	0						46	123	1549	78	2442					
27	44	0	0	0	62	449	0	0	0						47	44	0	0	0					
28	45	1426	27	2377	63	45	2156	28	3466						48	45	1426	27	2377					
29	168	0	0	0	64	56	2494	37	3775						49	168	0	0	0					
30	226	0001	27	0009	65	31	1935	23	2608						50	226	0001	27	0009					
31	31	0001	0	0	66	110	2386	84	3124						51	31	0001	0	0					
32	31	1447	18	2491	67	0	0	0	0						52	31	1447	18	2491					
33	257	0002	42	0013	68	308	1983	211	2894						53	257	0002	42	0013					
34	304	0	0	0	69	494	0	0	0						54	304	0	0	0					
35	63	0996	32	1961	70	551	0	0	0						55	63	0996	32	1961					

表-5.10 (2) 港内輻輳情報(ケース2)

ノード情報

リンク情報

番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均
1	1,319	0	0	0	36	253	0	0	0	71	876	0	0	0	1	1,319	1,747	123	418.68	3.6	294	0	0	0	71	1,571	0	0	0
2	0	0	0	0	37	422	0.000	2	0.006	72	986	0	0	0	2	0	0	0	0	37	240	0	0	0	72	0	0	0	0
3	1,551	0.001	79	0.010	38	443	0.011	120	0.040	73	986	0	0	0	3	1,571	0	0	0	38	138	0	0	0	73	0	0	0	0
4	1,417	0	0	0	39	848	0.000	6	0.007	74	1,299	0	0	0	4	1,551	0	0	0	39	102	0	0	0	74	0	0	0	0
5	134	0	0	0	40	19	0	0	0	75	20	3.67	17	3.61	5	134	0	0	0	40	238	0.021	24	0.207	75	0	0	0	0
6	134	1.207	72	2.246	41	19	1.056	9	2.228	76	23	0	0	0	6	1,417	0.000	49	0.012	41	54	0	0	0	76	0	0	0	0
7	1,123	0	0	0	42	867	0.001	88	0.007	77	21	1.374	11	2.623	7	1,123	0.000	3	0.025	42	288	0.001	2	0.127	77	0	0	0	0
8	871	0	0	0	43	252	0	0	0	78	425	0	0	0	8	871	0	0	0	43	1,541	0.002	235	0.013	78	0	0	0	0
9	852	0	0	0	44	253	0	0	0	79	422	0	0	0	9	852	0	0	0	44	20	0	0	0	79	0	0	0	0
10	404	0	0	0	45	1,119	0	0	0	80	124	2.465	93	3.287	10	404	0	0	0	45	1,561	0.001	97	0.019	80	0	0	0	0
11	406	1.045	198	2.142	46	294	0	0	0	81	561	0	0	0	11	425	0	0	0	46	0	0	0	0	81	0	0	0	0
12	448	0	0	0	47	240	0	0	0	82	532	3.243	396	4.357	12	0	0	0	0	47	0	0	0	0	82	0	0	0	0
13	0	0	0	0	48	54	0	0	0	83	23	2.080	17	2.815	13	0	0	0	0	48	253	0	0	0	83	0	0	0	0
14	0	0	0	0	49	138	0	0	0	84	1,571	0.002	112	0.027	14	0	0	0	0	49	0	0	0	0	84	0	0	0	0
15	425	0	0	0	50	135	0.888	55	2.179	85	536	0.018	3	3.177	15	48	0	0	0	50	686	0	0	0	85	0	0	0	0
16	62	0	0	0	51	102	0	0	0	86	23	0	0	0	16	315	0	0	0	51	45	0	0	0	86	0	0	0	0
17	363	0	0	0	52	103	1.291	58	2.293	87	124	0.623	14	5.522	17	284	0	0	0	52	112	0	0	0	87	0	0	0	0
18	48	0	0	0	53	238	0.000	7	0.007	88	45	0	0	0	18	114	0	0	0	53	31	0	0	0	88	0	0	0	0
19	47	1.076	21	2.408	54	50	1.276	29	2.200	89	112	0	0	0	19	170	0	0	0	54	110	0	0	0	89	0	0	0	0
20	315	0	0	0	55	288	0.000	9	0.005	90	31	0	0	0	20	125	0	0	0	55	0	0	0	0	90	0	0	0	0
21	284	0	0	0	56	1,253	0	0	0	91	110	0.252	5	5.575	21	45	0	0	0	56	309	0	0	0	91	0	0	0	0
22	114	0	0	0	57	1,541	0.028	648	0.066	92	0	0	0	0	22	168	0.020	14	0.240	57	731	0	0	0	92	0	0	0	0
23	113	1.112	59	2.130	58	20	0	0	0	93	309	1.254	45	8.611	23	281	0.002	10	0.048	58	845	0	0	0	93	0	0	0	0
24	170	0	0	0	59	20	1.237	11	2.248	94	20	5.261	11	9.566	24	31	0	0	0	59	876	0	0	0	94	0	0	0	0
25	125	0	0	0	60	1,560	0	0	0	95	0	0	0	0	25	312	0.000	6	0.015	60	986	0	0	0	95	0	0	0	0
26	123	1.600	76	2.590	61	252	0	0	0	96	0	0	0	0	26	359	0.000	2	0.016	61	986	0	0	0	96	0	0	0	0
27	45	0	0	0	62	686	0	0	0	97	0	0	0	0	27	62	0	0	0	62	1,299	0	0	0	97	0	0	0	0
28	45	1.034	25	1.862	63	45	2.156	28	3.466	98	0	0	0	0	28	422	0.002	5	0.145	63	20	0	0	0	98	0	0	0	0
29	168	0	0	0	64	112	2.322	76	3.422	99	0	0	0	0	29	422	0	0	0	64	448	0	0	0	99	0	0	0	0
30	281	0.001	35	0.010	65	31	1.935	23	2.608	100	0	0	0	0	30	848	0.040	147	0.229	65	23	0	0	0	100	0	0	0	0
31	31	0	0	0	66	110	2.383	84	3.120	101	0	0	0	0	31	19	0	0	0	66	443	0	0	0	101	0	0	0	0
32	31	1.339	17	2.441	67	0	0	0	0	102	0	0	0	0	32	867	0.000	10	0.008	67	124	0	0	0	102	0	0	0	0
33	312	0.002	56	0.013	68	308	1.869	204	2.822	103	0	0	0	0	33	0	0	0	0	68	561	0	0	0	103	0	0	0	0
34	359	0.000	4	0.008	69	731	0	0	0	104	0	0	0	0	34	1,120	0.001	41	0.030	69	536	0	0	0	104	0	0	0	0
35	63	1.125	34	2.085	70	845	0	0	0	105	0	0	0	0	35	1,253	0.001	22	0.058	70	23	0	0	0	105	0	0	0	0

表-5.10 (3) 港内輻輳情報(ケース3)

ノード情報

番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均
1	700	0.650	553	0.823	36	304	0	0	0	71	923	0	0	0
2	0	0	0	0	37	173	0	0	0	72	0	0	0	0
3	923	0	0	0	38	117	0	0	0	73	0	0	0	0
4	923	0.009	75	0.114	39	56	0	0	0	74	0	0	0	0
5	85	0	0	0	40	170	0.016	13	0.211	75	0	0	0	0
6	838	0.000	20	0.012	41	131	0	0	0	76	0	0	0	0
7	534	0.011	62	0.095	42	301	0.003	21	0.049	77	0	0	0	0
8	311	0	0	0	43	919	0.004	202	0.017	78	0	0	0	0
9	292	0	0	0	44	0	0	0	0	79	0	0	0	0
10	122	0	0	0	45	919	0.001	58	0.016	80	0	0	0	0
11	153	0	0	0	46	0	0	0	0	81	0	0	0	0
12	0	0	0	0	47	0	0	0	0					
13	153	0	0	0	48	223	0	0	0					
14	109	0	0	0	49	0	0	0	0					
15	86	0	0	0	50	234	0	0	0					
16	23	0	0	0	51	0	0	0	0					
17	10	0	0	0	52	0	0	0	0					
18	0	0	0	0	53	13	0	0	0					
19	10	0	0	0	54	129	0	0	0					
20	10	0	0	0	55	0	0	0	0					
21	0	0	0	0	56	320	0	0	0					
22	10	0	0	0	57	234	0	0	0					
23	10	0	0	0	58	234	0	0	0					
24	13	0	0	0	59	247	0	0	0					
25	25	0	0	0	60	377	0	0	0					
26	110	0.006	3	0.237	61	377	0	0	0					
27	44	0	0	0	62	700	0	0	0					
28	154	0.000	1	0.063	63	0	0	0	0					
29	154	0	0	0	64	170	0	0	0					
30	292	0.004	5	0.223	65	17	0	0	0					
31	19	0	0	0	66	171	0	0	0					
32	311	0	0	0	67	10	0	0	0					
33	0	0	0	0	68	224	0	0	0					
34	534	0.004	20	0.112	69	206	0	0	0					
35	618	0.002	12	0.092	70	17	0	0	0					

リンク情報

番号	通過数	全平均	待ち数	待平均	番号	通過数	全平均	待ち数	待平均
1	700	0	0	0	36	227	0	0	0
2	0	0	0	0	37	377	0	0	0
3	923	0.000	16	0.010	38	171	0.007	24	0.052
4	838	0	0	0	39	292	0	0	0
5	85	0	0	0	40	19	0	0	0
6	84	1.311	43	2.562	41	19	0.834	10	1.585
7	534	0	0	0	42	311	0.000	19	0.007
8	311	0	0	0	43	223	0	0	0
9	292	0	0	0	44	223	0	0	0
10	122	0	0	0	45	534	0	0	0
11	121	1.165	65	2.169	46	304	0	0	0
12	170	0	0	0	47	173	0	0	0
13	0	0	0	0	48	131	0	0	0
14	0	0	0	0	49	117	0	0	0
15	153	0	0	0	50	116	1.192	63	2.194
16	44	0	0	0	51	56	0	0	0
17	109	0	0	0	52	54	1.265	30	2.276
18	86	0	0	0	53	170	0.001	16	0.007
19	85	1.388	50	2.360	54	131	1.070	67	2.092
20	23	0	0	0	55	301	0.001	35	0.007
21	10	0	0	0	56	618	0	0	0
22	0	0	0	0	57	919	0.035	366	0.087
23	0	0	0	0	58	0	0	0	0
24	10	0	0	0	59	0	0	0	0
25	10	0	0	0	60	919	0	0	0
26	10	1.049	5	2.098	61	223	0	0	0
27	0	0	0	0	62	234	0	0	0
28	0	0	0	0	63	0	0	0	0
29	10	0	0	0	64	0	0	0	0
30	10	0	0	0	65	13	3.054	10	3.970
31	13	0	0	0	66	129	1.846	83	2.869
32	15	1.082	8	2.029	67	0	0	0	0
33	25	0	0	0	68	320	1.985	211	3.010
34	110	0.001	10	0.010	69	234	0	0	0
35	44	1.170	24	2.146	70	234	0	0	0

(iv) 出港管制によるリンク閉塞……No. 59,

No. 5, No. 35 など。

b. 先行船の存在によるリンク閉塞により発生する待ち現象……No. 3, No. 84, No. 57 など

(i) 後続船の航行速度が早いときの追突現象回避のために発生する。

(ii) 後続船の前方安全距離 ($5L$: L = 船の全長) よりリンクの距離が長い場合に発生する。

② ノードで発生する待ち現象

ノードにおける待ち現象は、一般にノードが先行船の存在により閉塞されており、後続船の進入を阻害するときに発生する。今回のシミュレーションにおいては、ノードに次のような機能を考慮してあるために待ち現象が発生すると考えられる。

a. 航行船舶が先行船との安全距離 ($5L$) を確保するために発生する。……No. 1, No. 3 など

b. 入港船舶が連続して同一バース群に着桟するとき、先行船の操船行動のため、後続船がバース前面で待つことにより発生する。……No. 4, No. 7 など

c. 離桟船舶があるとき、その施設前面が閉塞されるために発生する。……No. 22, No. 30 など

d. 出港船舶が港内で合流するため発生する。……No. 43

(㉑) 港内航路のリンク、ノード別待ち時間の検討

リンクおよびノードにおける待ち現象のうち、フルバース待ちや夜間入港規制、入港信号管制などの各種規制を考慮したために発生するリンク待ち現象を除き、船舶が港内を航行するときに生ずる待ち現象（航路容量待ち）について、ケース 3 の現状ケースにおけるシミュレーション結果および「西港」における船舶航行の実態を判断基準として将来計画段階のケース 1 およびケース 2 に対する輻輳状態について検討を進める。

① リンクにおいて発生した待ち時間の検討

今回のネットワーク・シミュレーションにおいては、ノードにおいて船舶全長の 5 倍の距離を航行する時間だけノードを閉塞することで、先航船との安全距離を確保させてから、次のリンクへ進行させている。各種管制のためのリンクを除き、港内のリンクでは 1 隻航行する船があった場合は、リンクが閉塞され、後続船が進入できないようなシステムとなっている。このシステムは、港内における先行船との接近または追越しを防止するために設けたもので、この機能によって待ち時間が発生す

る。

港内航路におけるリンク待ちの情報は、表－5. 11 である。

待ち船の平均待ち時間の最大値は各ケースとも No. 57 のリンクで、発生して、ケース 1 では 0.056 時間、ケース 2 では 0.066 時間、ケース 3 では 0.087 時間となっている。

シミュレーション実施ケース別に平均待ち時間をみれば、ケース 1 では No. 57 (0.056 時間) 次いで No. 38 (0.038 時間)、No. 84 (0.024 時間) の順となっており、ケース 2 では No. 57 (0.066 時間)、次いで No. 38 (0.040 時間)、No. 84 (0.027 時間) の順である。一方、昭和 51 年の現状ケースであるケース 3 では No. 57 (0.087 時間)、No. 84 (0.078 時間)、No. 38 (0.052 時間) の順となっている。No. 84、No. 57 リンクで待ち時間が大きいのは、港口部付近のリンクのため、入港船または出港船が $5L$ の間隔で連続して前のノードから進入しようとする事が多いがリンクの距離が長いために先行船がリンクを占有航行していて、リンクに進入できない後続船に待ち時間が生じているためである。ここでは、速力差による接近を防止するには長すぎるリンク距離を設定したためで、本来は速力差のコントロールにより十分航行できるものである。なお、ケース 3 でケース 1、2 に比較して大きな待ち時間が発生しているのは、ケース 3 では小型船の隻数が多いために上記の現象が顕著に出たためと思われる。

「西港」における航行実態から見れば、後続船が先航船と必要以上の間隔をとったり、また過度に接近することは考えられず、現状ケースを含め実際と若干の差異があったために発生した待ち現象と思われる。将来計画段階における待ち時間としては、このようなシミュレーション条件について、多少、実際の航行状態と差異はあったものの安全側の検討結果であり、昭和 51 年の現状ケースと比較し特に大きな待ち時間を示していないことから、ほぼ現状程度の輻輳状態と推測される。

② ノードにおいて発生した待ち時間の検討

a. 係留施設前面ノードの待ち時間

係留施設前面のノードにおける待ち時間についてみれば、表－5. 12 のとおりである。この表から明らかなように、入港船舶が通過する係留施設前面のノードでは待ち現象がほとんど生じていないのに対し、出港船舶が通過する係留

表- 5.11 港内航路リンクにおける待ち現象

ケース 1					ケース 2					ケース 3				
番号	通過数	全平均(h)	待ち数	待平均(h)	番号	通過数	全平均(h)	待ち数	待平均(h)	番号	通過数	全平均(h)	待ち数	待平均(h)
84	1277	0.002	110	0.024	84	1,571	0.002	112	0.027	84	923	0.012	142	0.078
3	1257	0.001	77	0.011	3	1,551	0.001	79	0.010	3	923	0.000	16	0.010
5	134	0.	0	0.	5	134	0.	0	0.	5	85	0.	0	0.
7	829	0.	0	0.	7	1,123	0.	0	0.	7	534	0.	0	0.
8	577	0.	0	0.	8	871	0.	0	0.	8	311	0.	0	0.
9	558	0.	0	0.	9	852	0.	0	0.	9	292	0.	0	0.
12	391	0.	0	0.	12	448	0.	0	0.	12	170	0.	0	0.
78	368	0.	0	0.	78	425	0.	0	0.	78	153	0.	0	0.
15	368	0.	0	0.	15	425	0.	0	0.	15	153	0.	0	0.
17	306	0.	0	0.	17	363	0.	0	0.	17	109	0.	0	0.
20	258	0.	0	0.	20	315	0.	0	0.	20	23	0.	0	0.
21	226	0.	0	0.	21	284	0.	0	0.	21	10	0.	0	0.
24	169	0.	0	0.	24	170	0.	0	0.	24	10	0.	0	0.
29	168	0.	0	0.	29	168	0.	0	0.	29	10	0.	0	0.
30	226	0.001	27	0.009	30	281	0.001	35	0.010	30	10	0.	0	0.
33	257	0.002	42	0.013	33	312	0.002	56	0.013	33	25	0.	0	0.
34	304	0.	0	0.	34	359	0.000	4	0.008	34	110	0.001	10	0.010
37	367	0.000	1	0.006	37	422	0.000	2	0.006	37	154	0.000	1	0.006
79	367	0.	0	0.	79	422	0.	0	0.	79	154	0.	0	0.
38	388	0.009	89	0.038	38	443	0.011	120	0.040	38	171	0.007	24	0.052
39	551	0.000	5	0.007	39	848	0.000	6	0.007	39	292	0.	0	0.
42	570	0.000	30	0.008	42	867	0.001	88	0.007	42	311	0.000	19	0.007
45	822	0.	0	0.	45	1,119	0.	0	0.	45	534	0.	0	0.
56	956	0.	0	0.	56	1,253	0.	0	0.	56	618	0.	0	0.
57	1,245	0.021	456	0.056	57	1,541	0.028	648	0.066	57	919	0.035	366	0.087
46	294	0.	0	0.	46	294	0.	0	0.	46	304	0.	0	0.
47	240	0.	0	0.	47	240	0.	0	0.	47	173	0.	0	0.
53	238	0.000	9	0.007	53	238	0.000	7	0.007	53	170	0.001	16	0.007
55	288	0.000	17	0.005	55	288	0.000	9	0.005	55	301	0.001	35	0.007

施設前面のノードで待ち現象が比較的多く発生している。このことは、入港時における着栈のための操船行動は、同一バース群に連続して船舶が到着する場合を除き、後続船舶の航行できるよう係留施設前面のノード容量をセットしたのに対し、出港船舶の離栈行動中においては係留施設前面の航行を禁止し、水路奥部から出港する船舶は離栈行動中の船舶の前面で安全距離を確保するため待機現象を生ずるようシミュレーションの仮定条件を組込んだためである。

各シミュレーションケース別に待ち現象が発生した船舶の平均待ち時間をみれば、ケース1ではNo.22(0.221時間)、No.40(0.209時間)、No.28(0.168時間)の順となっており、ケース2ではNo.22(0.240時間)、No.30(0.229時間)の順となっている。一方、現状のケース3においてはNo.26(0.237時間)、No.30(0.223時間)、No.40(0.211時間)の順となっている。

各ケースの平均待ち時間はケース1が0.097時間、ケース2が0.126時間、ケース3が0.088時間

表-5.12 係留施設前面ノードにおける待ち時間

	ケース 1					ケース 2					ケース 3				
ノード 区分	ノード 番号	通過数	全平均 (h)	待ち数	待平均 (h)	ノード 番号	通過数	全平均 (h)	待ち数	待平均 (h)	ノード 番号	通過数	全平均 (h)	待ち数	待平均 (h)
○	3	1,277	0.	0	0.	3	1,571	0.	0	0.	3	923	0.	0	0.
○	4	1,257	0.	0	0.	4	1,551	0.	0	0.	4	923	0.009	75	0.114
○	7	829	0.	0	0.021	7	1,123	0.000	3	0.025	7	534	0.011	62	0.095
○	8	577	0.	0	0.	8	871	0.	0	0.	8	311	0.	0	0.
○	9	558	0.	0	0.	9	852	0.	0	0.	9	292	0.	0	0.
○	64	391	0.	0	0.	64	448	0.	0	0.	64	170	0.	0	0.
○	11	368	0.	0	0.	11	425	0.	0	0.	11	153	0.	0	0.
○	13	368	0.	0	0.	13	425	0.	0	0.	13	153	0.	0	0.
○	14	306	0.	0	0.	14	363	0.	0	0.	14	109	0.	0	0.
○	16	258	0.	0	0.	16	315	0.	0	0.	16	23	0.	0	0.
○	17	226	0.	0	0.	17	284	0.	0	0.	17	10	0.	0	0.
○	19	169	0.	0	0.	19	170	0.	0	0.	19	10	0.	0	0.
×	22	168	0.021	16	0.221	22	168	0.020	14	0.240	22	10	0.	0	0.
×	23	226	0.001	4	0.066	23	281	0.002	10	0.048	23	10	0.	0	0.
×	25	257	0.000	1	0.041	25	312	0.000	6	0.015	25	25	0.	0	0.
×	26	304	0.	0	0.	26	359	0.000	2	0.016	26	110	0.006	3	0.237
×	28	367	0.003	6	0.168	28	422	0.002	5	0.145	28	154	0.000	1	0.003
×	29	367	0.	0	0.	29	422	0.	0	0.	29	154	0.	0	0.
×	66	388	0.	0	0.	66	443	0.	0	0.	66	171	0.	0	0.
×	30	551	0.005	18	0.140	30	848	0.040	147	0.229	30	292	0.004	5	0.223
×	32	570	0.000	4	0.014	32	867	0.000	10	0.008	32	311	0.	0	0.
×	34	823	0.001	17	0.029	34	1,120	0.001	44	0.030	34	534	0.004	20	0.112
×	35	956	0.002	9	0.165	35	1,253	0.001	22	0.058	35	618	0.002	12	0.092
○	36	294	0.	0	0.	36	294	0.	0	0.	36	304	0.	0	0.
○	37	240	0.	0	0.	37	240	0.	0	0.	37	173	0.	0	0.
×	40	238	0.025	28	0.209	40	238	0.021	24	0.207	40	170	0.016	13	0.211
×	42	288	0.001	3	0.087	42	288	0.001	2	0.127	42	301	0.003	21	0.049
×	45	1,265	0.002	77	0.028	45	1,561	0.001	97	0.019	45	919	0.001	58	0.016
	平均待ち時間				0.097	平均待ち時間				0.126	平均待ち時間				0.088

○ ; 入港時の船舶が航行するノード

× ; 出港時の船舶が航行するノード

間となっており、到着船舶の増大に比例し待ち時間が増大しているもののその差は最大0.038時間(2.28分間)程度である。

なお、ケース3では、No.4およびNo.7のノードにおいて他のケースに比較して大きな待ち時間が発生しているが、これは、ケース3が港湾施設整備の途中段階(現状ケース)であり、船舶の到着が特定施設に限定され同一バース群に到着する船舶が多いために、バース前面ノードで待ち現象が発生しやすいことに起因してい

ると思われる。

シミュレーション上では係留施設をバース群として1個のノードで代表させたが、実際には長さを持っている。また、船舶の航行実態をみれば、離棧船舶は、主航路(航路中央部)を航行する他の船舶の情勢を確認しつつ主航路へのアクセスをはかっている。

したがって、今回のシミュレーションは船舶航行の実態に比較し安全側の前提条件で検討を進めており、将来計画段階における平均待ち時間の最

表－5.13 出港船舶の合流による待ち時間 (No.43 ノード)

ケース 1				ケース 2				ケース 3			
通過数	全平均	待ち数	待平均	通過数	全平均	待ち数	待平均	通過数	全平均	待ち数	待平均
1,244	0.002	179	0.017	1,541	0.002	235	0.013	919	0.004	202	0.017

大値をみても、また平均値をみても現状ケースに比較し若干の増加にすぎず、操船解らんにとまあ待ちとしては特に問題となる輻輳状態ではないと判断される。

b. 出港船舶の合流による待ち時間

出港船舶が合流する地点において、合流ノードが先行船によって閉塞されている場合に待ち現象が発生する。今回のシミュレーションにおいて合流ノードは係留施設前面のノードを除けば、商港区係留施設から出港する船舶と勇払港区等の係留施設から出港する船舶の合流する No.43 ノードである。このノードにおける待ち時間をシミュレーションケース別にみれば表－5.13 のとおりである。

ケース1では、待ち現象が生じた船舶の平均待ち時間は0.017時間を示し、ケース2では待ち現象発生隻数が増加したものの平均待ち時間は0.013時間となっている。

一方のケース3で発生した平均待ち時間は0.017時間となっており、待ち現象の発生隻数はケース2の場合より少ないが大きな待ち時間を示している。

将来計画段階における平均待ち時間については、現状を再現したケース3の待ち時間とほぼ同程度であり、またシミュレーションで表現される No.43 ノードについては実際は面積的広がりを持っていることから現状程度の輻輳状態であると予測できる。

5.4.4 シミュレーションの映画化

これは、苫小牧西港のシミュレーションの途中経過の16mm映画化で、COM (Computer Output Micro-film) を利用し、すべて電子計算機で行った。

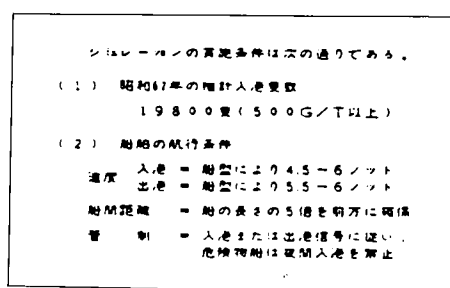
図－5.12 (1)～図－5.12 (6)は、その映画の一画面である。

図－5.12 (1)は、ケース1のシミュレーションの条件を説明している画面である。

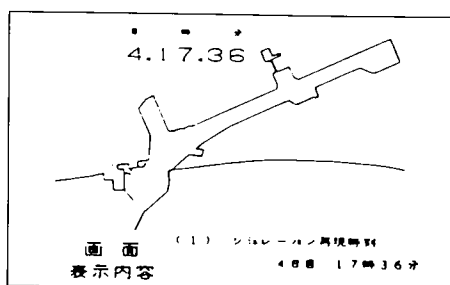
図－5.12 (2)は、画面上部に表示されるシミュレーション

時刻の説明であり、4日17時36分が表示されている。

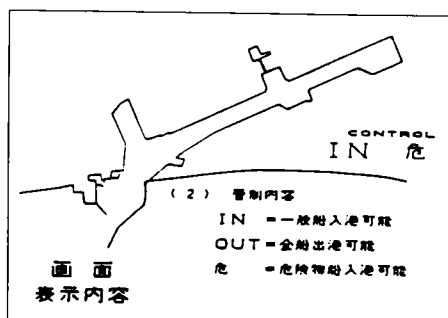
図－5.12 (3)は、管制の説明である。入出港管制は『IN』および『OUT』で示され、危険物積載船の入港が許されるときは『危』がCONTROLの下に表示される。



図－5.12 (1) シミュレーションの映画化



図－5.12 (2) シミュレーションの映画化



図－5.12 (3) シミュレーションの映画化

図-5.12 (4)は、管制による待ち船の待機場所の説明である。

図-5.12 (5)は、経路とバースの説明である。

図-5.12 (6)は、シミュレーション実行中の1画面である。

映画をみると、シミュレーションがどのようになされているかがよく理解されるばかりでなく、シミュレーション結果で問題点の一つとしてあげられた出港管制における図-5.8の43番の合流ノードにおける一船あたり平均待ち時間が約50秒であることの実感的な感覚がつかめよう。もちろん、3番、14番、15番のバース群におけるフルバース待ちの状態や、14番、15番へ向う危険物船の夜間入港規制による滞船のようもよく理解される。

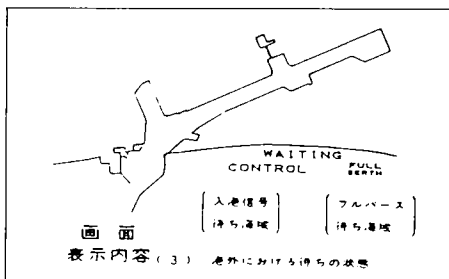


図-5.12 (4) シミュレーションの映画化

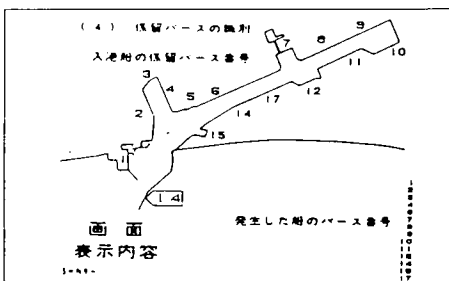


図-5.12 (5) シミュレーションの映画化

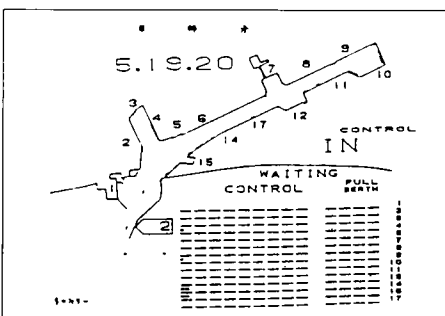


図-5.12 (6) シミュレーションの映画化

5.5 結言

かつて海上交通は、船舶の性能と地形をも含めた自然条件を考慮しさえすれば何も問題は起こらなかったと思われる。しかし、現在では、船舶交通量の増大、巨大船や危険物船の出現により、船舶の輻輳を考慮せねばならなくなり、その方面の調査を行って安全性を十分確認した上でなければ、大規模港湾の開発、航路の整備、管制の導入等は片手落ちであるといってもさしつかえない時代となった。

本章では、上記の現実をふまえて開発されたネットワーク・シミュレーションを提案した。ネットワーク・シミュレーションは、ミクロな海上交通流シミュレーションでは対応できないほど広大な海域におけるシミュレーションの要請と、予算面から電子計算機の容量が小さく計算時間が少なくてすむシミュレーションの開発の要請が重なったことから、きめ細かいことは犠牲にしてマクロ的、全体的なことがらを評価しようというシミュレーションである。

当初は海上交通計画代替案の相対的な評価に重点を置いて開発された。しかし、利用頻度と利用範囲が拡がり、学識経験者、海事関係者の適切な指導と助言を受け、現在では根本原理が非常に理解しやすいこと、現状交通のシミュレーション結果が経験とあっていること、さらに、とって代る簡単にして強力な手法が見当たらないことから絶対的数値の是非にも言及する場合も多くなり、開発者として責任を強く感ずる次第である。

このシミュレーションに手を加えて、操縦性能として旋回性と増減速特性を考慮し船舶タイプに応じた操船判断を取り入れて、シミュレーションの拡張も部分的にはあるが行って、ミクロシミュレーションへのアプローチも志している。しかし、シミュレーションの仮定が複雑になり、万人を説得させることが難しい。誰にでも理解できるネットワーク・シミュレーションは、仮定の簡明化の一極端として、今後も若干の改良の余地はあるものの、海上交通計画における有効な手法の一つとして、今後も根強く利用されると思われる。

ネットワーク・シミュレーションの隆盛で一つ忘れてはならないことは、わが国の海上交通工学で著しく発展した海上交通実態観測調査のおかげである点である。入力データの船舶タイプごとの経路や航行速力の決定は実態観測結果なくしては絶対に不可能といってよいからである。

ネットワーク・シミュレーションはバージョンが数多くあり、今回提案した型が完成品であるということではない。今後も、多くの欠点を直して、しかも海上交通に

本質的に関わる機能を付加していくことが必要である。

章末文献 41), 43), 44), 46), 47), 48), 52), 53), 54), 55), 56), 57), 59), 60), 61), 62), 63) は、すべて本モデルの実際の適用例であるのでそれらを参照していただければ幸いである。それらは、航路体系の検討、港湾計画資料の作成、海上に人工島を造るにあたっての海上交通影響、湾岸道路や海上横断橋の検討等広範囲に及んでおり、今後の利用も既に幾つかの計画が決っている。

このことは、本モデルが、簡易ではあるが、実際によく再現し、実用的であるという評価を受けているという証左といえよう。

以上より、主要な成果は次のようにまとめられる。

- (1) 海上交通計画に必要な情報を得るための非常に強力な手法であるネットワーク・シミュレーションが開発された。
- (2) ネットワーク・シミュレーションの有効性が、数多くの現実の計画で確かめられた。
- (3) 海上を航行する大小さまざまな船舶の交通容量の一つの考え方が提案された。
- (4) ネットワーク・シミュレーションの映画化によって、従来では、分かりづらかったシミュレーション手法が、誰にでもわかりやすくなった。このことは、シミュレーションの真偽のチェックを簡単にできるようにした。
- (5) ネットワーク・シミュレーションの入力データ作成の要請から、海上交通流の観測の重要性が増し、海上交通流の観測に好影響を与えた。

参 考 文 献

- 1) 杉崎昭生：海上交通工学とシミュレーション，航海 第 36 号，日本航海学会，1972 年，pp. 14 ~ 18.
- 2) 山田一成：船舶交通のシミュレーションについて，航海 第 37 号，日本航海学会，1972 年，pp. 64 ~ 66.
- 3) 杉崎昭生：海上交通シミュレーション，航海 第 48 号，日本航海学会，1976 年，pp. 55 ~ 58.
- 4) MIZE J.H. Cox J.G 著，小笠原暁，青沼龍雄，秋葉博，梅林光寿，沢村正信訳：シミュレーションの基礎，培風館，1969 年.
- 5) 福島三七治：港湾特論，修教社，1957 年.
- 6) 巻島 勉：杉崎氏たちの海上交通シミュレーションについての論評，航海 第 50 号，日本航海学会，1976 年，pp. 23 ~ 27.
- 7) 杉崎昭生：巻島氏の論評について，航海 第 51 号，

日本航海学会，1977 年，pp. 62 ~ 63.

- 8) 杉崎昭生：航路設計の一考察，航海 第 28 号，日本航海学会，1968 年，pp. 100 ~ 102.
- 9) 杉崎昭生：通常航路容量について，日本航海学会誌 第 44 号，1970 年，pp. 37 ~ 40.
- 10) 大津皓平，杉崎昭生：浦賀水道における交差回数について，日本航海学会誌 第 44 号，1970 年，pp. 41 ~ 47.
- 11) 山田一成，田中健一：狭水路における船舶交通流のシミュレーション，日本航海学会誌 第 44 号，1970 年，pp. 59 ~ 65.
- 12) 木俣昇，石崎肇士：シミュレーションによる航路計画の研究，土木学会論文報告集 第 194 号，1971 年，pp. 113 ~ 126.
- 13) 山田一成，田中健一：船舶交通流におけるシミュレーション結果の評価とその推定について，日本航海学会論文集 第 48 号，1972 年，pp. 135 ~ 138.
- 14) 船舶交通容量調査報告書（瀬戸内海商港調査）I，II，運輸省第 3 港湾建設局，1970 年，1971 年.
- 15) 海上交通計画調査報告書（航路容量調査），運輸省第 3 港湾建設局，1973 年.
- 16) シーバース計画調査報告書（友ヶ島水道航路容量調査），運輸省第 3 港湾建設局，1974 年.
- 17) 東京湾航路体系調査報告書（その 1），（その 2），運輸省第 2 港湾建設局，日本海難防止協会，1973 年，1974 年.
- 18) 杉崎昭生，鞠谷宏士，大津皓平，今津隼馬：航路設計のための海上交通容量 I ~ VII，日本航海学会論文集 第 50 号 ~ 53 号，1973 年 ~ 1975 年.
- 19) 笹嶋 博，奥山育英，早藤能伸，佐々木芳寛，佐々木典倫子他：水路系における船舶交通シミュレーションプログラム（その 1），港湾技研資料 No. 223 号，1975 年.
- 20) 小山健夫，荒井 誠：東京湾航路体系のシミュレーションによる評価について，日本造船学会論文集 140 号，1976 年，pp. 272 ~ 278.
- 21) 三木楯彦，原 潔：関門通航容量のシミュレーション，航海 第 50 号，日本航海学会，1976 年，pp. 17 ~ 22.
- 22) 海上交通安全システムに関する調査研究（中間報告書），日本海難防止協会，1977 年，pp. 51 ~ 69.
- 23) 関門航路計画資料（その 4）— 船舶航行シミュレーションの関門航路計画への応用 —，運輸省第 4 港湾建設局，1977 年.
- 24) 伊勢湾航路体系基礎調査報告書，運輸省第 5 港湾

- 建設局，1977年。
- 25) 奥山育英：海上交通シミュレーションの開発と応用，昭和54年度港湾技術研究所講演会講演集，1979年，pp.197～248。
 - 26) 来島海峡海上交通シミュレーション解析報告書，海上保安大学校海上交通工学研究会，1982年。
 - 27) 関門海峡海上交通シミュレーション解析報告書，海上保安大学校海上交通工学研究会，1983年。
 - 28) 長畑 司：操船シミュレータ，航海 第36号，日本航海学会，1972年，pp.35～41。
 - 29) 岩井 聰，前畑幸弥：操船シミュレータとその要求性能，航海 第41号，日本航海学会，1973年，pp.11～17。
 - 30) 松浦由次：IHI操船シミュレータとその利用例，航海 第74号，日本航海学会1982年，pp.77～82。
 - 31) M. Hirano, J. Takashima, S. Moriya : A Handy-Type Marine Simulator for Ship Maneuverability Evaluation, Proceeding of Third International Conference on Marine Simulation (MARSIM 84), ROTTERDAM, 1984。
 - 32) 杉崎昭生：シミュレータについて，航海 第47号，日本航海学会，1975年，pp.83～89。
 - 33) 杉崎昭生：海上交通流シミュレータ，航海 第80号，日本航海学会，1984年，pp.8～13。
 - 34) 杉崎昭生：ミクロの海上交通流シミュレーション，同上，pp.14～19。
 - 35) 奥山育英：ネットワーク・シミュレーション，同上，pp.20～27。
 - 36) 長沢 明：避航を考慮した海上交通シミュレーション，同上，pp.27～34。
 - 37) 小林弘明，小山健夫：航路交差部に対する航行管制のシミュレーション・スタディ，同上，pp.35～41。
 - 38) 原 潔，井上欣三：航跡データの操船への応用，同上，pp.42～54。
 - 39) 今津隼馬：衝突危険の評価について，同上，pp.55～62。
 - 40) 日本海難防止協会による海上交通安全システム調査研究報告書，海上保安庁，1976年。
 - 41) 伊勢湾航路容量調査報告書，運輸省第五港湾建設局，1976年。
 - 42) 奥山育英，中辻 隆，早藤能伸：輸送ネットワークの評価シミュレーション，土木学会第31回年次学術講演概要集第4部，1976年，pp.189～190。
 - 43) 大規模港船舶航行規制実態調査報告書，運輸省第二港湾建設局，1977年。
 - 44) 伊勢湾航路体系基礎調査報告書，運輸省第五港湾建設局，1977年。
 - 45) 奥山育英，佐々木芳寛，中辻 隆：輸送ネットワークの評価シミュレーションの拡張，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第4部，1977年，pp.167～168。
 - 46) 秋田湾航行安全対策調査報告書，運輸省第一港湾建設局，1978年。
 - 47) 苫小牧港（西港地区）航行安全対策調査報告書，日本海難防止協会，1978年。
 - 48) 苫小牧港（東港地区）安全対策調査報告書，日本港湾協会，1978年。
 - 49) 奥山育英，藤原 哲：輸送ネットワークの評価シミュレーションの開発，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集第4部，1978年，pp.327～328。
 - 50) 海上交通安全システムに関する調査研究，日本海難防止協会，1979年。
 - 51) 奥山育英：海上交通流のマクロ評価シミュレーション，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集第4部，1979年。
 - 52) 海上交通量の総量規制に関する調査研究，日本海難防止協会，1980年。
 - 53) 新港（茨城）安全対策調査報告書，茨城県土木部港湾課，1981年。
 - 54) 大阪湾における海上交通の幅狭度解析調査，運輸省第三港湾建設局，1981年。
 - 55) 大阪湾岸道路関連神戸港湾施設計画調査報告書，運輸省港湾局，1981年。
 - 56) 大阪港港湾計画に係る航路体系調査，大阪市港湾局，1981年。
 - 57) 航路泊地計画手法調査報告書，日本海難防止協会，1981年。
 - 58) 奥山育英，藤原 哲：海上交通のマクロ評価シミュレーション，第6回電算機利用に関するシンポジウム講演概要集，土木学会電算機利用委員会，1981年，pp.21～24。
 - 59) 海上交通影響調査報告書，運輸省第二港湾建設局，1982年。
 - 60) 横浜港港湾計画に係わる船舶航路体系調査，横浜市港湾局，1982年。
 - 61) 昭和57年度広域処理場整備事業船舶航行影響調査，大阪湾広域臨海環境整備センター，1983年。
 - 62) 東京湾海上交通影響調査報告書，日本海難防止協

会，1983 年。

- 63) 川崎港港湾計画に係る航路体系及び安全対策調査報告書，東京湾海難防止協会，1983 年。
- 64) 大嶋良三：宇高航路における避航実態，航海 第 38 号，日本航海学会，1972 年，pp.43～50。
- 65) 平野新太郎：船舶の直交交差における待ち時間分布および交差容量について，日本航海学会論文集 第 57 号，1977 年，pp.145～153。
- 66) 苫小牧港（西港地区）航行シミュレーション（16 mm 映画），日本海難防止協会，1978 年。
- 67) 大阪湾海上交通シミュレーション（16 mm 映画），運輸省港湾技術研究所，1981 年。
- 68) 南本牧埠頭埋立計画に係る船舶交通調査，横浜市港湾局，1983 年。
- 69) 東京湾横断道路計画調査（船舶交通），日本道路公団，1985 年。
- 70) 藤井弥平：序説海上交通工学，海文堂，1971 年。
- 71) 藤井弥平，巻島 勉，原 潔：海上交通工学，海文堂，1981 年。

6. 大規模埋立工事における工事関連船計画への適用

6.1 緒言

本章は、前章までに提案した計画情報作成の応用例として、海上空港、沖合人工島といった大規模埋立工事における土運船等工事関連船の運航計画の作成および検討の手法を確立するための基礎資料として、関西国際空港建設計画で調査研究した結果をとりまとめたものである。関西国際空港の計画は、現在も引き続き検討中であることから、数値自体は重要ではない。むしろ、本章で例示した具体的な数値よりも、他の大規模埋立工事にも十分応用が可能な手法に、重点を置いている。

本章の構成は、6.2で工事関連船の海上交通への影響を予測する。ここでは工事関連船の運航計画を策定する際に、あるいは工事関連船の運航管理システムを設計しようとする際に、必要な計画情報を得る。そのために、まず、一般船の航行の動勢、および工事関連船の動勢を求めて、シミュレーションを実施し、シミュレーション結果より工事関連船の運航上の問題点を見つける。

6.3では、シミュレーションの結果、問題が指摘された明石海峡航路における土運船の運航計画を策定する際に、必要な計画情報を得るための検討を行う。ここでは、非常に混雑している明石海峡における航行量を時間ごとに求め土運船の適切な運航時間帯決定に必要な情報を与える。

6.4では、工事関連船の運航管理システムを考える場合に、基本的な情報として要求される一般船舶の動向の予測を試みる。これは、大規模埋立工事に伴う工事関連船の航行が一般船舶の航行に影響を及ぼす場合、一般船舶には規制を設けずに、土運船が一般船舶の動静をつかみ、その情報によって工事関連船の運航を支援しようというものである。この部分を発展させて、一般船舶の運航情報によって土運船等の運航が一般船舶へ及ぼす影響をどこまで軽減できるかを究明し、その時点で、やむを得ない場合に限って、一般船舶への最小限度の指導および規制等を検討していく。

6.5は、工事区域内および土砂積出し桟橋における計画システムを取扱う。工事区域内や土砂積出し桟橋における作業船の輻輳の程度を予測するとともに、土運船の適切な隻数を求める土運船の運航計画作成システムである。

6.2 工事関連船の海上交通へ及ぼす影響の把握

6.2.1 工事関連船の交通量と能力

大規模埋立工事によって発生する工事関連船の交通量

は、工法、資材供給方法、工期、工事関連船の航行・積載能力、作業能力等に依存している。

関西国際空港の当初計画において建設工事に必要と推定された工事関連船の推定交通量、および運航時刻は表-6.1～表-6.4に示すとおりである。表には、空港供用開始後の空港利用者のための交通船および燃料補給のためのタンカーも、海上交通へ影響を及ぼすところからこれに含めている。

また、これら船舶の性能は、表-6.5に示すものを想定した。空港建設開始時までの時間の余裕と技術の進歩を勘案して、現存する工事関連船の能力よりも高めの値を設定した。燃料補給タンカーの能力等については後出の表-6.9と同一値を用いた。

なお、現在の自航式作業船の排水トン数と全長、型幅、吃水の関係を、おのおの図-6.1、図-6.2、図-6.3に示した。ただし図中の排水トン数が10,000トン以上の土運船については現存しないことから推定して求めた値である。

表-6.1 土運船の性能と運航時刻
(護岸工事最盛期)

経路	船種	船型	運航時刻	隻数/12H
空港～明石海峡	土運船	7,500m ²	明石発 6:30間隔1時間6分	11
			空港発 6:40～1時間6分	11
空港～明石海峡	ガット船	7,500m ²	明石発 6:10間隔30分	24
			空港発 6:20～30分	24
空港～淡路島 東津	土運船	7,500m ²	淡路発 9:00, 12:00, 15:00	3
			空港発 11:00, 14:00, 17:00	3
空港～大阪	セメント船	2,000t	大阪発 9:00, 16:00	2
			空港発 10:00, 15:00	2
空港～由良瀬戸	土運船	7,500m ²	由良発 9:00	1
			空港発 11:00	1

表-6.2 土運船の性能と運航時刻
(埋立工事最盛期)

経路	船種	船型	運航時刻	隻数/12H
空港～明石海峡	ガット船	7,500m ²	明石発 6:30間隔1時間6分	11
			空港発 6:40間隔1時間6分	11
空港～紀伊	土運船	7,500m ²	紀伊発 6:05間隔20分	36
			空港発 6:15間隔20分	36
空港～大阪	セメント船	2,000t	大阪発 9:00, 16:00	2
			空港発 10:00, 15:00	2
空港～由良瀬戸	土運船	7,500m ²	由良発 9:00	1
			空港発 11:00	1

表-6.3 土運船の性能と運航時刻（Ⅱ期工事
最盛期かつ空港共用時）

経 路	船 種 船 型	運 航 時 刻	隻数/12H
空港～明石海峡	土運船 7,500m ²	明石発 6:45 間隔2時間 空港発 7:15 〃 2時間	6 6
空港～紀伊	土運船 7,500m ²	紀伊発 6:05 〃 34分 空港発 6:15 〃 34分	21 21
空港～神戸	アクセス船約400人乗	神戸発 6:10 〃 30分 空港発 6:20 〃 30分	24 24
空港～淡路島	アクセス船約200人乗	淡路島発 6:20 〃 1時間 空港発 6:40 〃 1時間	12 12
空港～明石海峡	タンカー 3,500kl	明石発 10:30, 11:00 空港発 16:30, 17:00	2 2
空港～大阪	タンカー 3,500kl	大阪発 7:00 空港発 12:00	1 1
空港～由良瀬戸	タンカー 3,500kl	由良瀬戸発 6:30 空港発 12:30	1 1
空港～由良瀬戸	タンカー 3,500kl	由良瀬戸発 7:00 空港発 16:00	1 1

表-6.4 土運船の性能と運航時刻
（空港完成時）

経 路	船 種 船 型	運 航 時 刻	隻数/12H
空港～神戸	アクセス船 550t	神戸発 6:05 間隔20分 空港発 6:15 間隔20分	36 36
空港～淡路島	アクセス船 340t	淡路島発 6:20 間隔1時間 空港発 6:40 間隔1時間	12 12
空港～明石海峡	タンカー 3,500kl	明石発 10:30, 11:00 空港発 16:30, 17:00	2 2
空港～大阪	タンカー 3,500kl	東北発 7:00 空港発 12:00	1 1
空港～由良瀬戸	タンカー 3,500kl	由良瀬戸発 6:30 空港発 12:30	1 1
空港～由良瀬戸	タンカー 6,000kl	由良瀬戸発 7:00 空港発 16:00	1 1
空港～由良瀬戸	タンカー 8,000kl	由良瀬戸発 5:30 空港発 16:30	1 1

表-6.5 工事関連船および交通船の性能等

船 種	船 型 (G.T)	速 力 (ノット)	船 長 (m)
ガット船	750m ²	積載時 11.0 空船時 13.0	50 50
セメント船	2,000t	積載時 10.0 空船時 12.0	80 80
土 運 船	7,500m ²	積載時 6.0 空船時 8.0	155 155
交 通 船	550t, 340t	25.0	48

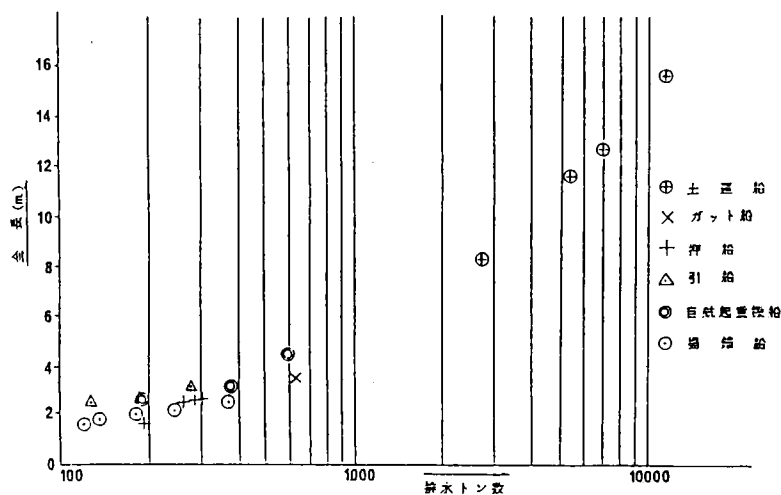


図-6.1 自航船の排水トン模と全長の関係

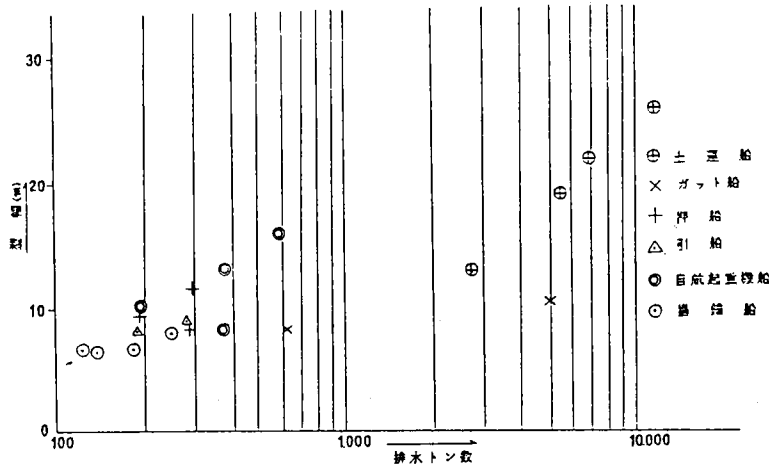


図-6.2 自航船の排水トン数と型幅の関係

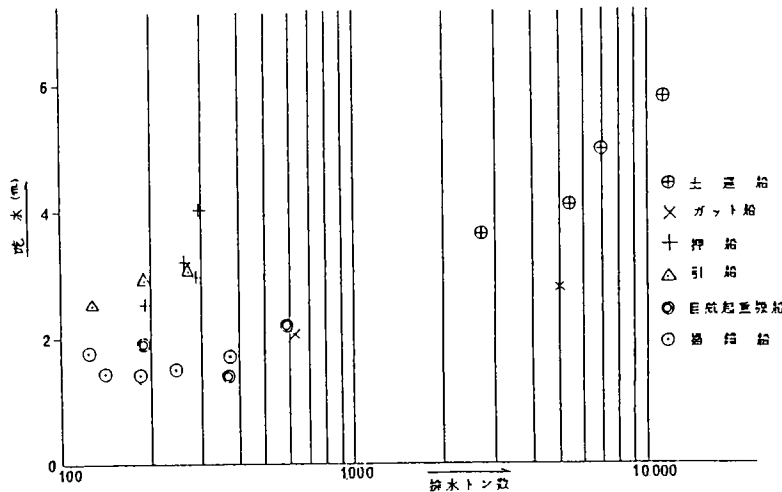


図-6.3 自航船の排水トン数と吃水の関係

6.2.2 一般船の交通量と運航特性

大規模埋立工事に付随する工事関連船によって航行を阻害される側の一般船舶の交通量は、現状の交通量については、昭和54年5月29～30日に運輸省第三港湾建設局企画課、海域整備課、関西国際空港調査室、港湾技術研究所システム研究室が共同で実施した大阪湾船舶航行実態調査の結果に基づいて推定した。この実態調査はレーダ4台を利用し、明石、由良、加太の3海峡部とすべての湾内の港口部および泉州沖での目視観測からなるものである。将来交通量は、大阪湾の基礎構想の策定の際の作業資料をもとにして、関西空港調査室が推定した値であり、船種・船型ごとおよび大阪湾内の各ODご

とに求められている。ここでは全船種・全船型をまとめた交通量を表-6.6、表-6.7、表-6.8に示すにとどめる。シミュレーションを実行する際には、さらに船種・船型ごとまでに細分している。

船種・船型の区分については、大きさ、速力、操船性が、船舶の輻輳を論ずる際には重要であることから、それらが比較的似かよったクラスをまとめた。その区分およびそれらの平均的な性能は、表-6.9である。

運航特性の一つとして、大阪湾および湾内各港を出入する船舶の交通量の時間変動があげられる。これらについては表-6.10の実績値を得た。フェリーについては、これらと異なり、朝に出入港が集中するパターン、夕刻

表-6.6 現状OD交通量(全体)

(単位: 量/12月)

D \ O	明石海峡	由良瀬戸	加太瀬戸	神戸第1	神戸第2	神戸第5	神戸第6	尼崎	大阪・堺	新寺・東大津	東大津南	阪南	明石	若 原	須 磨	厚 田	洲 本	津 名	大 阪	合 計
明石海峡		8.1	10.68	43.58	1.05	15.6	21.85	35.84	113.06	17.26	4.73	5.06								276.61
由良瀬戸	9.73			14.13	6.2	12.12	7.66	7.77	53.04	2.94	0.36	0.67				6.00				120.62
加太瀬戸	8.75	0.09		4.33	0.32	0.49	0.16	6.5	24.41	6.71		0.63								52.39
神戸第1	57.73	11.27	3.44		6.01	8.76			41.66	8.22		16.68					24.00			177.77
神戸第2	2.15	3.56				1.65	0	4.19	35.81	0.77										48.13
神戸第5	9.25	14.03	1.07	12.71	1.03		7.09	10.0	20.57	5.58	0.76	1.52								83.89
神戸第6	30.01	7.91	0.26			11.41		26.75	37.84	4.8	3.11	1.03						7.00		142.77
尼崎	25.41	6.1	4.06	6.51	0.91	15.54	24.65		43.04	14.51	14.51	13.33								157.5
大阪・堺	143.76	42.71	38.62	52.04	23.26	21.42	36.47	32.43		65.45	18.2	16.48					2.00			492.84
新寺・東大津	20.07	3.03	6.8	10.16	0.44	3.84	1.51	15.0	57.21		1.23	2.15								121.71
東大津南	2.48			4.09		0.66	0.41	1.05	9.19	1.05										19.13
阪南	10.26	1.52	1.78			3.12	3.62	5.91	35.46											61.67
明石													26.00							26.00
若 原													26.00							26.00
須 磨																			24.00	24.00
厚 田		6															15.00			21.00
洲 本				23					2								15.00			40.00
津 名						7														7.00
大 阪															25.00					25.00
合 計	319.6	103.42	66.71	170.63	39.22	94.81	110.69	154.97	477.75	126.37	31.78	57.88	26.00	26.00	25.00	21.00	41.00	7.00	24.00	1923.75

表-6.7 昭和65年OD交通量(全体)

(単位: 量/12月)

D \ O	明石海峡	由良瀬戸	加太瀬戸	神戸第1	神戸第2	神戸第5	神戸第6	尼崎	大阪・堺	新寺・東大津	東大津南	阪南	明石	若 原	須 磨	厚 田	洲 本	津 名	大 阪	合 計
明石海峡		9.29	11.34	41.77	1.04	16.42	23.07	43.36	142.19	15.44	10.24	10.06								324.22
由良瀬戸	11.00		0.06	13.71	6.64	13.39	7.97	9.26	65.01	2.74	0.59	1.28				6.60				138.27
加太瀬戸	9.52	0.11		4.28	0.31	0.52	0.21	8.08	31.84	6.06	0.35	1.25								61.73
神戸第1	56.44	11.11	3.22		4.40	7.59	0.94	4.47	44.00	6.23	4.09	26.68					26.00			195.17
神戸第2	1.95	3.60	0.16	3.22		1.41	0.19	3.69	35.36	0.53	1.06	1.95								53.11
神戸第5	9.80	15.38	1.12	11.10	0.97		8.10	11.76	25.65	4.90	1.17	2.89								92.64
神戸第6	32.99	7.41	0.29	1.36	0.22	12.81		45.16	96.73	3.72	4.87	2.98						7.70		176.16
尼崎	30.04	7.09	4.75	5.92	0.87	17.15	29.52		58.68	14.12	5.53	27.49								201.16
大阪・堺	181.72	52.35	48.51	53.09	25.09	26.20	48.63	45.21		69.58	32.77	37.80					2.10			623.05
新寺・東大津	18.15	2.88	6.04	7.58	0.34	3.37	1.72	15.20	61.15		1.61	3.62								121.86
東大津南	6.62	0.06	0.44	5.95	0.46	1.58	0.79	2.11	19.91	1.99		1.40						12.00		52.91
阪南	16.60	2.50	2.69	13.98	2.60	4.56	5.50	9.28	61.94	1.52	4.24									125.51
明石													29.00							29.00
若 原													29.00							29.00
須 磨																			26.00	26.00
厚 田		6.60															16.00			22.60
洲 本				25.00					2.10								16.00			43.10
津 名						7.70						12.00								19.70
大 阪															27.00					27.00
合 計	374.83	118.38	78.62	166.96	42.94	105.00	134.34	197.60	603.76	126.43	78.51	117.32	29.00	29.00	27.00	22.60	44.10	19.70	26.00	2362.07

表-6.8 昭和75年O D交通量(全体)

(単位: 隻/12H)

D	O	明石海峡	由良瀬戸	加太瀬戸	神戸第1	神戸第2	神戸第5	神戸第6	尼 崎	大阪・堺	浜寺・泉大津	泉大津南	阪 南	明 石	石 屋	淡 路	原 田	洲 本	摩 名	大 阪	合 計
明石海峡			10.24	11.41	40.76	1.02	15.33	25.15	56.44	163.87	13.54	12.95	13.59								364.30
由良瀬戸	12.00			0.06	13.65	6.82	13.65	8.57	11.92	74.69	2.59	0.80	1.78				8.60				155.11
加太瀬戸	9.69	0.11			4.21	0.30	0.49	0.26	10.78	36.58	5.35	0.45	1.67								69.89
神戸第1	54.79	11.04	3.11			3.75	6.40	1.04	5.30	45.74	5.21	4.82	32.85					32.00			205.95
神戸第2	1.87	3.65	0.15	2.81			1.20	0.21	4.25	36.28	0.43	1.28	2.48								54.62
神戸第5	9.27	15.54	1.05	9.78	0.85			9.28	13.93	27.09	4.05	1.44	3.60								95.98
神戸第6	37.97	8.13	0.37	1.55	0.26	14.49			69.16	77.79	4.08	7.69	4.79						10.00		236.28
尼 崎	38.31	9.06	6.13	6.87	0.99	19.42	44.16			83.82	15.84	8.76	45.07								278.43
大阪・堺	212.74	60.61	57.62	56.17	26.09	27.44	67.31	66.17			71.99	47.71	56.91					2.70			753.36
浜寺・泉大津	16.06	2.75	5.33	6.41	0.29	2.75	1.86	17.48	62.31			1.85	4.33								121.42
泉大津南	8.21	0.07	0.59	7.49	0.58	1.93	1.30	3.57	29.86	1.89			2.53						12.00		70.02
阪 南	22.38	3.45	3.62	17.34	3.28	5.55	8.93	15.43	91.52	1.82	7.30										180.62
明 石															35.00						35.00
石 屋															35.00						35.00
淡 路																				34.00	34.00
原 田		8.60																21.00			29.60
洲 本					31.00					2.70								21.00			54.70
摩 名								10.00				12.00									22.00
大 阪																36.00					36.00
合 計	423.29	133.25	89.44	196.04	44.23	106.65	178.07	274.34	732.25	126.69	107.05	169.58	35.00	35.00	36.00	29.60	55.70	22.00	34.00		2832.26

表-6.9 一般船舶の区分と性能

船 種	船 型 (G/T)	平均 速 力 (ノット)	平均 船 長 (m)
貨 物	~ 500	9.2	38.5
	500 ~ 3,000	10.2	80
	3,000 ~ 10,000	11.7	117
	10,000 ~	11.9	211
タ カ ン !	~ 500	9.2	38.5
	500 ~ 3,000	9.7	80
	3,000 ~ 10,000	9.9	117
	10,000 ~	10.6	211
フ リ エ !	~ 500	13.5	38.5
	500 ~ 3,000	13.5	80
	3,000 ~	12.4	117
その他	~ 500	8.6	38.5
	500 ~	10.0	80

表-6.10 3時間帯別発生隻数率(%)
(6時から18時までを100%
としたとき)

発 生 地 点	6:00 ~ 9:00	9:00 ~ 12:00	12:00 ~ 15:00	15:00 ~ 18:00	計
1 明 石 海 峡	29%	16%	29%	26%	100%
2 由 良 瀬 戸 (友ヶ島水道)	35	25	20	20	100
3 加 太 瀬 戸	24	24	20	32	100
4 神 戸 第 1	13	27	27	33	100
5 神 戸 第 2	41	12	35	12	100
6 神 戸 第 5	30	15	21	34	100
7 神 戸 第 6	20	23	34	23	100
8 尼 崎	18	32	25	25	100
9 大 阪 ・ 堺	27	18	24	31	100
10 浜 寺 ・ 泉 大 津	10	29	38	23	100
11 大 津 南	25	38	25	12	100
12 阪 南	38	32	16	24	100

に入出港が集中するパターン、日中に定時間隔で入出港するパターンが見られたので、個々のケースに応じてこれら3パターンを採用した。

6.2.3 シミュレーションによる影響の測定

大規模埋立工事に際しては、大量の土運船等の運航が一般航行船舶の運航に影響を及ぼすことも予想され、工事関連船の運航に何らかの管理の必要性も考えられる。そのため、運航管理に関する計画をたてるに際して、計画担当者に計画情報を提供することを試みた。6.2.1, 6.2.2 に述べた情報も計画をたてるに際しては必要不可欠な最も基本的な情報ではあるが、それだけでは海上交通がどうなるかは予想し難く、土運船等の運航管理計画を策定する際の問題点を見つけることが難しい。

以上の点をふまえて運航管理計画策定の際に有用な計画情報を与えるために、大阪湾内の船舶交通シミュレーションを実施した。なお、このシミュレーションは、5.で述べたネットワーク・シミュレーションであることから、手法の具体的な内容は省略して結果の一部のみを述べる。

1) シミュレーションの実施ケース

大阪湾における海上交通シミュレーションは、6.2.2 で述べた海上交通実態調査の結果、および与えられた将来交通量予測値をもとにして、OD交通量を各OD・船種・船型・時間帯ごとに作成し、各ODごとに船種別にルートを設定し、船種・船型別速力を決定して、それらを入力データとして次の9ケースを実施した。

1. 空港予定水域迂回（昭和65年交通量，工事関連船なし）
2. 護岸工事最盛期（昭和65年交通量，工事関連船あり）
3. 埋立工事最盛期（昭和65年交通量，工事関連船あり）
4. 空港予定水域迂回（昭和75年交通量，工事関連船なし）
5. II期工事最盛期（昭和65年交通量，工事関連船・アクセス船・燃料運搬船あり）
6. 空港完成時（昭和75年交通量，アクセス船・燃料運搬船あり）
7. 空港予定水域迂回なし（昭和65年交通量，工事関連船なし）
8. 空港予定水域迂回なし（昭和75年交通量，工事関連船なし）

以上の8ケースはすべて将来ケースであるが、現状と比較するために、ケース0ともいうべき

0. 現状交通量（昭和54年）

を加えた。

2) シミュレーションの入力データ

実施したシミュレーション全ケースの入力データはそ

れだけで膨大な量となるのでここでは概要を述べるに留める。

シミュレーションで対象とする船舶のうち、一般船舶については、表-6.9の区分と性能とし、交通量は表-6.6～表-6.8を表-6.2の区分にまで細分した。船舶の発生時刻は、表-6.10で示される発生隻数の日変動パターンをもとにして、乱数をふって求めた。フェリーについては、別途6.2で述べた発生パターンによった。埋立工事関連船については、区分と性能に関しては表-6.5を用い交通量と発生パターンはそれぞれのケースに応じて表-6.1～表-6.4を用いた。

また、経路ごとのルートはケース2の場合のみを図-6.4に示した。図中の番号はノード番号であり、①から⑭までのノード番号は、表-6.6～表-6.8のOD地点で、①から⑭までが表の明石海峡から阪南に対応し、⑬が欠番で、⑭と⑮が明石と岩屋であり、⑯番が欠番で⑰番から⑳までが須磨から大磯までとなっている。

ノードおよびリンクの数はケースによって異なるが、ノードは約200、リンクは約800である。ノードに関しては座標値、およびノードのつながりを入力し、リンク長およびリンクの角度もそれらをもとに計算して、シミュレーションの実行時に利用している。

なお、その他の入力情報としては、ノードでは一般には右手方向優先とするが、明石海峡航路は優先航路とし、また、航路幅を700mとして容量を求めている。

3) シミュレーション結果

1) で述べた9ケースすべてのシミュレーション結果は、各ノード・各リンクごとに船種・船型別に示される。ここでは、そのうちの各ノードの利用率の比 ρ'/ρ の値のランク別表示を図-6.5、図-6.6に示す。これは、ケース2およびケース7の全船種・船型にわたっての値である。

図-6.6に示したケース7は工事関連船なしの場合で、この交通量に護岸工事最盛期の工事関連船をのせたのが図-6.5に示したケース2であるから、両者の差異は埋立工事による影響である。

これらと比較してみると、神戸沖、大阪沖の輻輳はほとんど変わらない。当然のことながら、土運船等のルートでは、輻輳の度合いが大きくなっていることがわかる。とくに、明石海峡航路への影響は強く、右側通航であることから土砂等を満載して空港へ向う場合により一層混雑することが示されている。護岸工事の最盛期には、瀬戸内海の高砂の利用を想定していることから、このような結果が得られる。

このシミュレーションは、既に述べたように工事に関

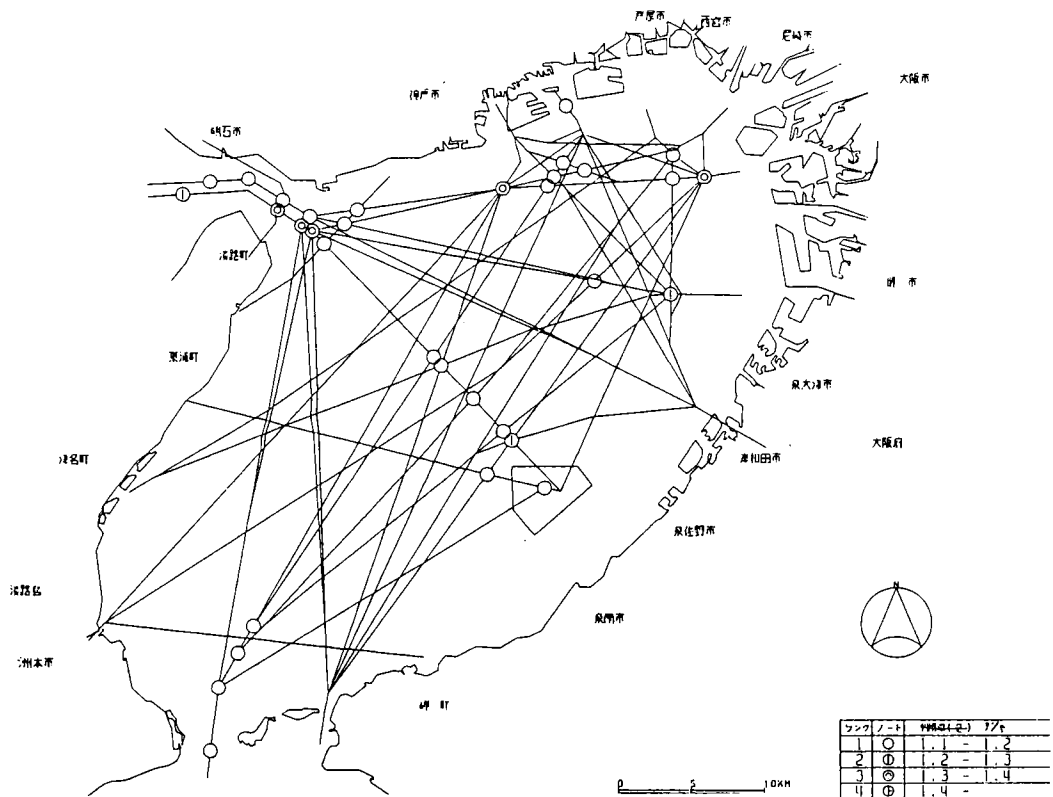


図-6.5 シミュレーション結果(ケース2, ρ'/ρ)

連する船舶の運航が一般船舶の航行にどの程度影響を及ぼすかを計画の時点で把握するものである。今回用いた入力データのケースのみに限って言えば、明石海峡を航行する一般船舶への影響が最も大きいことが示された。

4) シミュレーション結果の映画化

シミュレーションは、すべて電子計算機の中で実行され、結果は動的に計算したにも拘らず静的な数表または図面であり、シミュレーションの実行の際の船舶の動きを実際に見ることはできない。その欠点を補うために、またシミュレーションが正しく電子計算機内で実行されていることを確認するために、COM (Computer Output Microfilm) を利用して、シミュレーション過程の16 mm映画を、電子計算機から直接作成した。図-6.7は、その映画の一画面であり、船型別の船舶航行状況を一目で見ることができる。

映画化にあたっては、船舶の大きさを地形と同一の縮尺にすると船舶の大小の識別が困難になることから、船

舶の全長を L としたとき、船舶の進行方向に $8L$ 、幅方向に $3.2L$ の5角形の船の形で表した。この領域は、6.3.2で述べる船舶の閉塞領域である。時間については、実時間の1分間ごとの画面を0.25秒間映写する場合、すなわち実時間の240倍の速さで時間が経過するようにした。

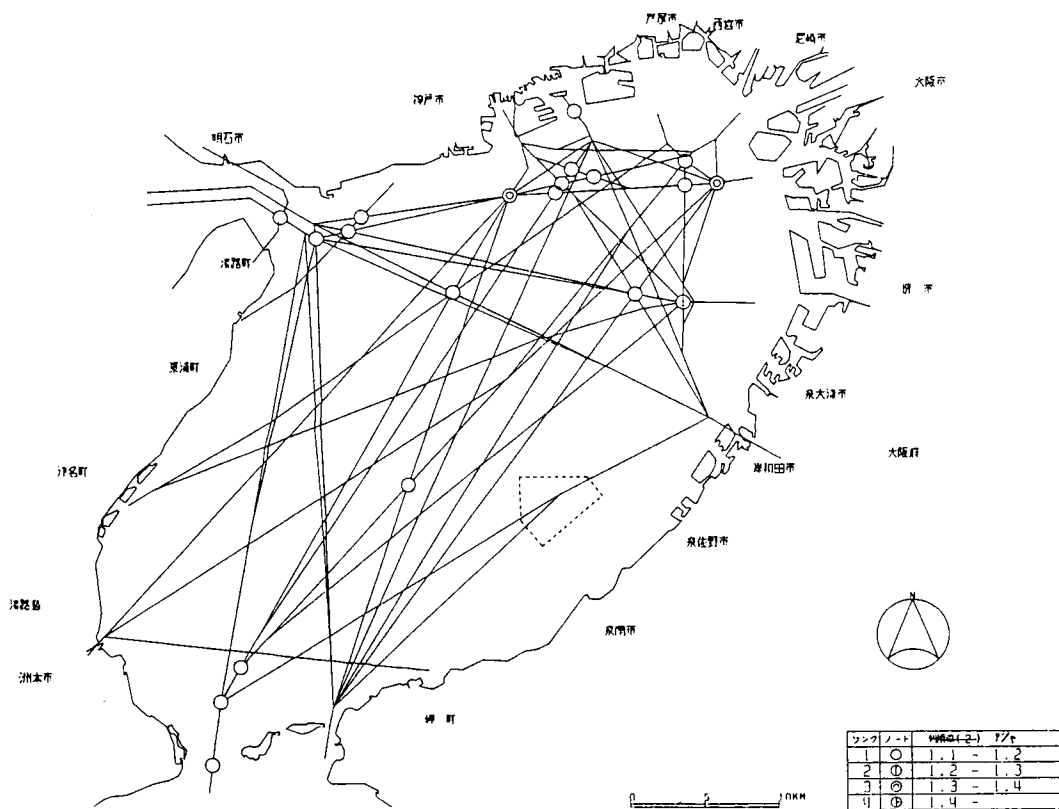


図-6.6 シミュレーション結果(ケース7, ρ'/ρ)

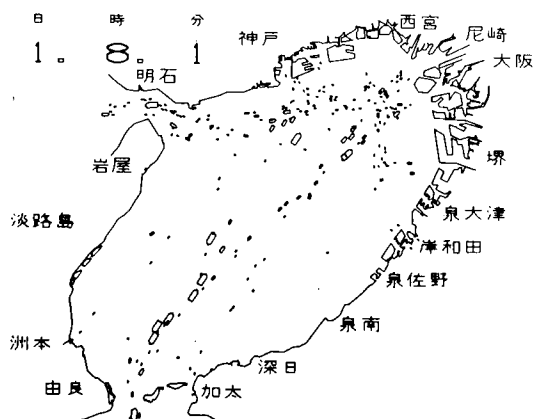


図-6.7 シミュレーションの映画化の一画面

6.3 狭水道交通に関する考察

6.3.1 明石海峡の現況

関西国際空港建設工事における土運船等の航行によって生じる一般船舶の航行への影響が最も大きい海域は、明石海峡航路であることが6.2.3 3)で示されたが、より詳細にここで考察することとする。

明石海峡の最新の交通量は、海上保安庁が実施した昭和56年7月28日14時から7月31日14時まで93日間の目視観測の結果である。この観測は、図-6.8の目視線上でルートA～Fの船舶について、目視線通過時刻、船種、船型、方向、速力を求めたものである。

明石海峡を通過する全長が50 m以上の船舶は、海上交通安全法から明石海峡航路の航行を義務づけられる。工事関連船は全長は50 m以上と想定されているので、航路内を航行せねばならず、図-6.8のルートAを右側通航することになる。この場合、明石海峡航路を横切るルートD、E、Fの航行船舶は操船性能がよい小型船が

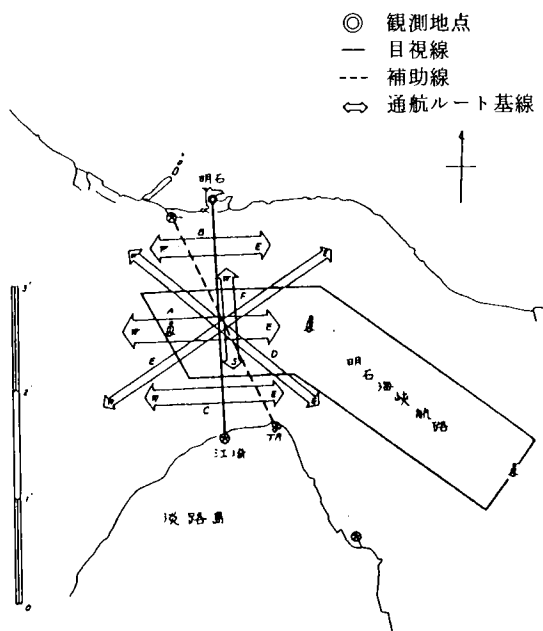


図-6.8 明石海峡通航ルート基線図
(昭和56年度通航船舶実態
調査報告書……海上保安庁
より転載)

多いことから、土運船が優先船ではあるものの特に幅狭
についての検討の必要性はないと思われる。問題となる
のは、明石海峡航路の片道幅700mが通航船舶によって
どれほど利用されているかであり、工事関連船が通航す
る余裕の有無をきめ細かに考察することが必要である。

そのため、A、D、Eの3ルート合計の交通量を船
種・船型別に1時間ごとに求め、東航・西航をおのおの
表-6.11～表-6.12に、平均通過時間をおのおの表-
6.13、表-6.14にまとめた。

船種・船型区分に属する船舶の全長の平均値は、お
のお表-6.15、表-6.16に示すとおりであった。これ
らの表で全長の平均値が0の欄は、3日間の観測で通航
実績がなかった船種・船型である。

また、明石海峡は潮流が速いので、参考までに観測期
間の潮流図を図-6.9に示す。

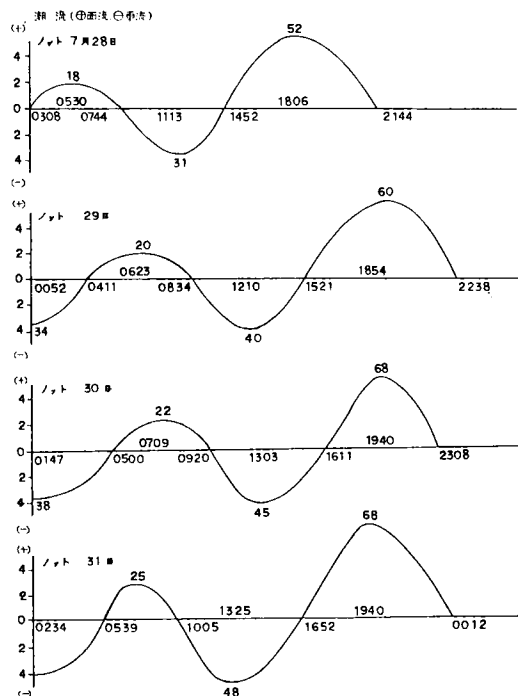


図-6.9 観測期間中の潮流図(昭和56年度通航
船舶実態調査報告書……海上保安庁より
転載)

(A, D, E 3ルート合計, 東航船, 3日間)

[illegible]

(A, D, E 3ルート合計, 西航船, 3日間)

		時間	14~15	15~16	16~17	17~18	18~19	19~20	20~21	21~22	22~23	23~24	24~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	
貨物	0	1日付	8	10	4	7	6	16	7	10	6	2	6	2	0	2	1	1	1	3	1	1	2	7	5	8	
	1	2日付	8	7	14	16	6	14	4	1	7	3	2	7	0	3	4	2	2	0	2	1	5	9	1	3	
	3日付	3	9	13	21	13	10	9	5	2	3	4	1	0	2	3	3	3	3	7	2	8	6	2	3		
	500	1日付	0	2	4	1	7	4	3	1	1	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	11		
	1	2日付	3	1	2	2	4	6	0	0	5	5	1	0	2	2	0	1	0	0	0	0	1	7	4	4	
	3日付	3	2	1	0	2	13	2	2	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0	2	0	0	
	3,000	1日付	0	0	0	0	2	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
	1	2日付	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	2	0	0	
	10,000	3日付	0	1	0	1	5	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	
	1	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
	500	2日付	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	
	3日付	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
客	0	1日付	5	1	1	0	3	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	1	2	3	
	1	2日付	0	3	11	4	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	
	3日付	0	3	7	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	1	2	4	4		
	500	1日付	4	1	1	1	1	3	0	2	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	1	1	0	0	4	
	1	2日付	9	2	3	5	3	1	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	3	4	
	3日付	5	2	0	4	2	5	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	3		
	3,000	1日付	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10,000	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	
	500	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
乗客	0	1日付	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
	1	2日付	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	
	3日付	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	500	1日付	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3,000	1日付	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10,000	3日付	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	1	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	500	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
乗客	0	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	500	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3,000	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10,000	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	500	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
乗客	0	1日付	2	1	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	6	2	4	0	0	1	0	1	5	1
	1	2日付	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	6	3	0	0	1	1	0	2	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	2	5	2	1	
	500	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3,000	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10,000	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	500	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
乗客	0	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	500	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	3,000	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	1	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10,000	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	500	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
乗客	0	1日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	2日付	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3日付	0	0	0																							

(A, D, E 3ルート合計, 東航船, 3日間, 単位 0.001時間)

		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000
--	--	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

(A, D, E 3ルート合計, 西航船, 3日間, 単位 0.001時間)

[illegible]

(A, D, E 3ルート合計, 東航船, 3日間, 単位 m)

- 119 -

表－6.16 船種船型時間別明石海峡通航船舶平均全長

(A, D, E 3ルート合計, 西航船, 3日間, 単位 m)

		時間																											
		14~15	15~16	16~17	17~18	18~19	19~20	20~21	21~22	22~23	23~24	24~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14				
貨物船	0	1日計	34	40	40	47	48	45	49	47	44	50	49	55	0	48	45	20	51	38	45	40	39	46	40	35			
	1	2日計	44	47	44	41	40	36	42	48	52	49	53	46	0	43	45	48	28	0	35	46	44	41	50	40			
	3日計	48	42	45	41	40	37	54	46	40	46	53	0	43	48	35	32	45	35	75	37	42	48	40	0				
	500	1日計	0	65	69	60	59	65	63	70	65	60	88	0	75	0	0	0	0	0	0	75	0	0	52	0			
客船	1	2日計	53	80	80	78	53	63	0	56	53	70	0	55	63	75	0	65	0	0	0	70	54	55	0	0			
	3日計	53	68	70	65	61	61	73	73	0	70	65	0	55	0	110	0	0	0	0	75	0	68	0	0				
	3,000	1日計	0	0	0	0	65	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140	0	0	0				
	1	2日計	100	0	140	0	100	0	120	0	0	120	0	0	0	110	0	85	130	0	0	132	95	0	0				
漁船	3日計	0	104	0	101	104	0	110	0	120	0	0	80	0	0	130	110	106	0	0	0	0	0	0	0				
	10,000	1日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	210	220	0	0	0	0	130	0	0	0	0	0	0				
	1	2日計	0	0	170	150	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	190	210	190	0	0	0	0	0	0				
	3日計	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	160	0	0	0	0	0	0	0				
タンカー	0	1日計	32	45	40	0	55	50	36	34	0	50	0	0	0	0	0	54	54	55	0	40	40	43	35				
	1	2日計	0	49	46	43	0	38	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	53	50	0				
	3日計	50	36	42	39	43	33	0	0	0	0	0	0	0	0	21	55	47	30	48	24	50	40	43	38				
	500	1日計	60	70	55	75	60	65	0	73	0	0	0	0	0	67	65	0	0	0	0	70	60	0	55				
コンテナ船	1	2日計	61	60	60	60	58	65	65	0	0	0	0	65	0	0	0	0	60	0	65	65	0	57	68				
	3日計	64	61	61	71	65	57	70	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	68	0	61	63	0				
	3,000	1日計	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	1	2日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
タンカー	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	10,000	1日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	260	0	220	0	0	0	0				
	1	2日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	0	0	0	0				
タンカー	0	1日計	24	0	24	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0				
	1	2日計	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	22	0	0				
	3日計	0	0	24	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0				
	500	1日計	0	0	0	0	80	0	83	0	0	80	0	0	0	0	80	0	0	0	0	80	0	0	77				
タンカー	1	2日計	0	0	0	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0				
	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3,000	1日計	0	0	0	0	0	174	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84	0	0	0				
	1	2日計	0	0	0	0	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
タンカー	3日計	0	0	0	0	82	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	82	0	0	0	0				
	10,000	1日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	1	2日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
タンカー	0	1日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	1	2日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	500	1日計	0	92	0	83	0	55	0	83	0	110	89	0	0	0	83	0	83	0	110	83	83	0	0	0			
タンカー	1	2日計	0	83	92	0	0	83	83	0	70	0	83	0	83	83	83	0	83	0	83	83	0	0	0				
	3日計	0	92	83	0	0	0	83	0	0	83	0	83	83	92	83	83	0	110	0	83	83	0	0	0				
	3,000	1日計	0	141	150	140	110	136	0	142	135	122	0	100	0	95	0	0	0	0	0	0	0	0	110				
	1	2日計	0	118	117	0	150	124	174	144	127	148	116	0	0	0	0	0	140	0	84	0	0	0	110				
タンカー	3日計	0	141	125	127	110	126	174	136	135	155	122	0	0	0	150	0	0	0	84	0	0	0	110	0				
	500	1日計	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0				
	1	2日計	0	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	30	0				
	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	23	0				
タンカー	0	1日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	1	2日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	500	1日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
タンカー	1	2日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3,000	1日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	1	2日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
タンカー	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	10,000	1日計	10	12	12	0	0	11	0	0	0	12	0	9	11	18	0	0	16	0	15	15	13	0	0				
	1	2日計	14	15	25	8	0	0	0	0	0	13	0	11	8	0	0	13	11	0	10	0	0	0	0				
	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	12	13	0	0	11	11	9	14	0	0					
タンカー	500	1日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	1	2日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3,000	1日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
タンカー	1	2日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	10,000	1日計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	1	2日計	0	0	0	0																							

6.3.2 明石海峡の幅方向の利用量

本節の解析にあたって次のような条件を設定する。

船種・船型 i の平均全長を L_i 、平均到着隻数を λ_i 、ある地点での平均通過時間を $1/\mu_i$ とし、到着はランダム到着、言いかえると、単位時間内の到着数が平均 λ_i のポアソン分布、到着時間隔では平均 $1/\lambda_i$ の指数分布であって、各船の到着は独立であることとする。

以上の条件の下で、明石海峡航路を通過する船舶の進行方向に垂直な基線を設けて通過船舶によって基線が利用されている量の確率分布を求める。この量が小さければ他の船舶が通る余裕があり、この量が大きければ前方が詰まっていて他の船舶は通れないことを意味する。基線の利用量および基線の通過時間は、以下に述べるが、閉塞領域を基にして求めた。閉塞領域とは、船舶が航行しているときにその船の周囲に形成される他の船が入り込まないような領域である。その形状は、進行方向に自船の全長の8倍を長軸とし、進行方向に垂直な方向に全長の3.2倍を短軸とする長円と報告されている¹³⁾。しかし、閉塞領域の大きさは確定的ではなく、今後の調査研究によって変ることと思われる。ここでは、 L_i を船舶 i の全長としたとき、その閉塞領域を $8L_i$ と $3.2L_i$ を二辺にもつ長方形として取扱うこととした。

船舶 i が基線を通過する時間は、速力を v_i とすると $8L_i/v_i$ 時間であり、閉塞領域を長方形と仮定したことにより、通過時間中基線の長さを $3.2L_i$ だけ利用している。

ここで、航路幅を実際の明石海峡航路の一方向700mとすると、基線の長さ700mのうちで利用されている長さの確率分布は、理論式では求まらない。船種・船型が1つの場合には通過時間が特別の分布のときに限って求められる。しかし、現実では速力も大きさも異なる多種類の船舶が通航することから、理論的には求まらなくなる。

電子計算機による数値解は、モデルが小さければ可能である。しかし、明石海峡のような実際例ではモデルが大きくなり、膨大な記憶容量と計算時間を必要とするので不可能である。そのため、比較的簡単に理論解を求めることのできる航路幅が無限大の場合の基線の利用量の確率分布を求めた。計算結果の取扱いとしては、700m以上を利用する確率が0であれば幅700mの制限をつけたことと同じである。また、700m以上の利用量の確率が0でなければ、大略、その確率以上の確率で700mの航路幅が全部利用されていることが解るので、後に述べるような検討が可能となる。

解析は、待ち合わせ理論による。待ち合わせ理論にお

いては、平均 λ のランダム到着、サービス時間が平均 $1/\mu$ の任意の分布、窓口の数が無限大の場合は時間が十分経過すると定常状態になり、定常解が平均 λ/μ のポアソン分布で与えられる。これは待ち合わせ理論において $M/G/\infty$ タイプと呼ばれている待ち合わせ問題である。サービス時間は、基線に閉塞領域がかかっている時間、すなわち、船舶と同時に移動している閉塞領域が基線を通過する時間である。

ここで、到着分布が平均 λ のポアソン分布、サービス時間の分布が平均 $1/\mu$ の一般分布、時刻0のときに系内の数が0とすると、待ち行列 $M/G/\infty$ においては時刻 t で系内の数が k である確率 $P_k(t)$ は、

$$P_k(t) = e^{-\lambda \int_0^t (1-H(x)) dx} \times (\lambda \int_0^t (1-H(x)) dx)^k / k! \dots \dots \dots (6.1)$$

と理論的に求められる。式(6.1)で、 $H(x)$ はサービス時間の分布関数である。

ここで、 $t \rightarrow \infty$ 、すなわち、時間が十分経過した場合を考えると

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_k(t) = e^{-\lambda/\mu} (\lambda/\mu)^k / k! = p_k \quad (k=0, 1, 2 \dots) \dots (6.2)$$

となり、 $P_k(t)$ は t に依存せず、 k にだけ依存する値 p_k となる。これは、平均 λ/μ のポアソン分布である。

明石海峡の航路幅の利用量にこの理論を適用すると、基線上に k 隻存在している確率は、上記の系内の数が k である確率と同じであり、その定常確率は式(6.2)の p_k で与えられる。基線上に k 隻存在しているということは、横方向に $3.2L$ の閉塞領域の幅があるので、 $3.2L \times k$ の長さだけ基線を利用していることを意味する。

以上により、船種・船型が1つの場合は、基線を利用する長さの確率分布が求められる。船種・船型が複数の場合には、船舶の到着、および通過時間の独立性から、船種・船型ごとに基線を利用する長さの確率分布を求めて次々にたたみ込みを行えばよい。

たたみ込みとは、 X が i である確率が p_i 、 Y が j である確率が q_j で、 X 、 Y が互に独立であるとき、 $X+Y$ の確率分布を求める手法であり、 $X+Y=k$ である確率は次のようにして求められる。

$$P_r \{X+Y=k\} = \sum_{i+j=k} p_i \times q_j \dots \dots \dots (6.3)$$

3変数以上の場合には、2変数のたたみ込みにより得られた確率分布に、次の確率分布を次々にたたみ込んでいくことにより、全変数のたたみ込みが得られる。

6.3.3 基線の利用量の確率分布

表-6.11～表-6.14で船種・種型別に1時間ごとの交通量と平均通過時間の実績値が3日間にわたって得られているので、6.3.2で述べた方法を適用すると、基線の利用量の確率分布、および、それをもとにして各種の統計量が得られる。

確率分布等の計算結果は膨大な量となるので、ここでは、そのうち重要と思われる基線利用量の平均値、確率分布の90%値、99%値、99.9%値、および空(利用量0)の確率のおおの時間変動を、図-6.10にまとめた。

図中で、細い実線、一点鎖線、破線、点線は、おのおの、基線の利用量の分布の平均値、90%値、99%値、99.9%値であり、図の左側のm単位の日盛を用いる。太い実線は空の確率であり、図の右側の目盛に従う。

また、図-6.10は上から東航、西航、および両方向の和についての幅方向の航路利用量の時間変動であることから、航路幅である700m、および、両方向の和の1,400mの線も表示した。明石海峡航路は片側幅700mで航路分離がなされているところから、両方向の和は、本来意味をもたないが、全体で1,400mとして片側幅を可変としたときの結果を見るために、参考として表示した。

この結果をみると、空である確率が大きく、通航船舶を散らばらせずに、片側へ3.2L幅ですきまなく詰める、一部、90%値で航路幅を超える時間が見られるも

の、十分余裕があることがわかる。これは、実測値を平均値とする最尤推定法の考え方を取っているからであり、実測値は変動していて平均値では有り得ないことから、既に確率が考慮されていると考えて差支えないことによる。

なお、ここで述べた基線の利用量の平均値を現実の幅700mで除した値は、6.2.3 3)で述べた航路要素がノードである場合の ρ に理論的に一致する。経験的ではあるが、非常に混雑した海域では ρ の値は日平均で0.1～0.2であり¹⁵⁾、0.2をこえる場合は、現実にはほとんど観測されず、それ以上に混雑しているときである。

ここでは、工事関連船までも考慮した基線利用量は求めなかったが、工事関連船の基線への到着がランダムの場合は、6.3.2で述べた方法で求められる。すなわち、工事関連船の全長と速力を考慮して基線通過隻数分布を求めて、次に全長を用いて基線通過隻数分布を利用量の分布に直し、それを次々にたたみ込んでいくことにより計算可能である。工事関連船の到着が、定期的もしくは定時である場合は、工事関連船だけの利用幅の確率分布が容易に求められるから、それをたたみ込めばよい。

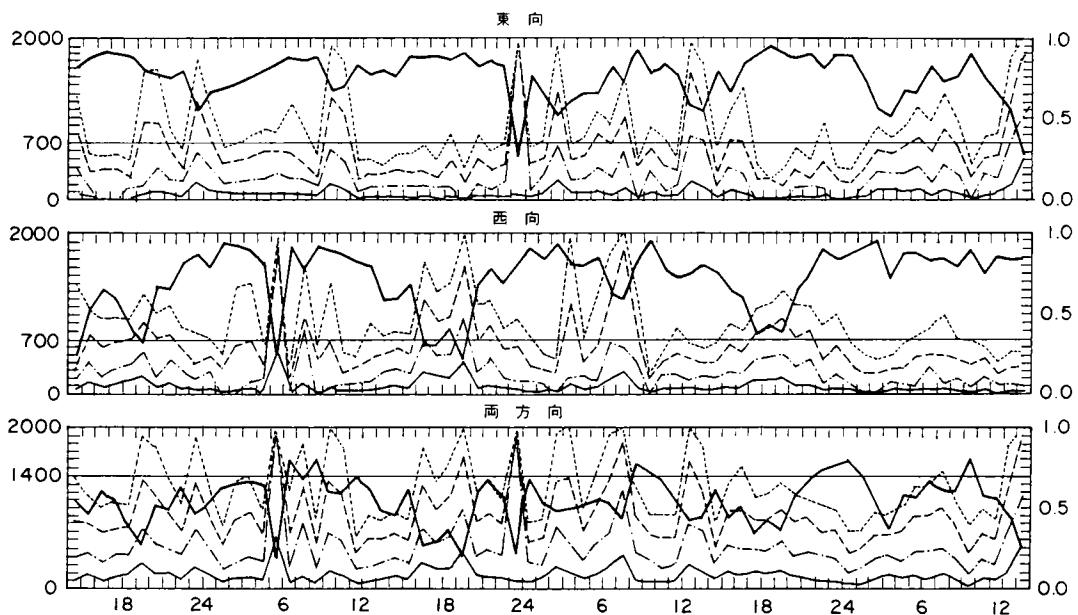


図-6.10 明石海峡における幅方向利用分布の平均値、90%値、99%値、99.9%値および空の確率の時間の変動

6.4 一般船舶の航行予測

6.4.1 基本的な考え方

大規模埋立工事における大量の工事関連船の安全な運航を目的とした運航管理システムは、日単位、週単位、月単位もしくはそれ以上の期間にわたっての土運船の運航を計画管理すると考えられる。それは工事の実施と直接に結合しており、また土砂等の供給地の状況にも応じて総合的にとらえられるべきものである。関西国際空港建設の調査においては、全体の工事を統括する工事管理システムを提案しており、そのサブシステムの1つに工事関連船の運航管理部門が考えられている。¹¹⁾

本章では、運航管理部門が安全かつ確実に工事関連船の運航を管理するために、工事区域外の海域における一般船舶の交通情報を土運船等に与える形で土運船の運航を支援する方法を取り上げる。この考え方は、大規模埋立工事によって発生する大量の工事関連船舶の影響を一般船舶へは及ぼさないで、可能な限り、工事施工者の側のみで処理しようという方針に基づいている。

その内容は、一般船舶の航行状況を適確に把握して、将来の航行状況を正確に予測することである。実際にはさらに、一般船舶の航行状況をもとにして土運船等の運航計画を作成する。この場合、土運船等の航行によって生じる一般船舶の航行への干渉を可能な限り低くおさ

ることとする。以上に述べた概念は図-6.11であり、本章で取扱う運航支援の方法は、図中の破線で囲まれた部分とする。

6.4.2 運航情報伝達の実態

一般船舶の航行状況の予測に先立って、工事関連船が航行する海域における一般船舶の動静が、現状においてどこまで把握できるかを調査した。調査は、大阪湾内の船舶動静に関係している各機関、すなわち海上保安庁の第五管区海上保安本部航行安全課、神戸保安部港務課、大阪海上保安監部港務課、大阪ハーバーレーダ局、港湾管理者の神戸市港湾局管理部海務課および港務課、大阪市港湾局管理部港管課および海務課、民間団体である阪神水先区水先人会阪神パイロット組合、東洋信号通信社神戸支店和田岬見張所、大阪出張所の各所を順に訪れ、聞き取り調査によった。

ヒヤリングによる調査結果を整理すると以下のようにまとめられる。

- I) 海上保安庁、港湾管理者は総トン数500 t以上の船を対象としている。
- II) 港湾管理者は対象船舶の入出港予定表を作成している。予定表には、船名、トン数、直前寄港地、直後寄港地、入出港予定時間などが記入されており、前日までに把握される。
- III) 東洋信号通信社の信号所は、港湾管理者の予定表お

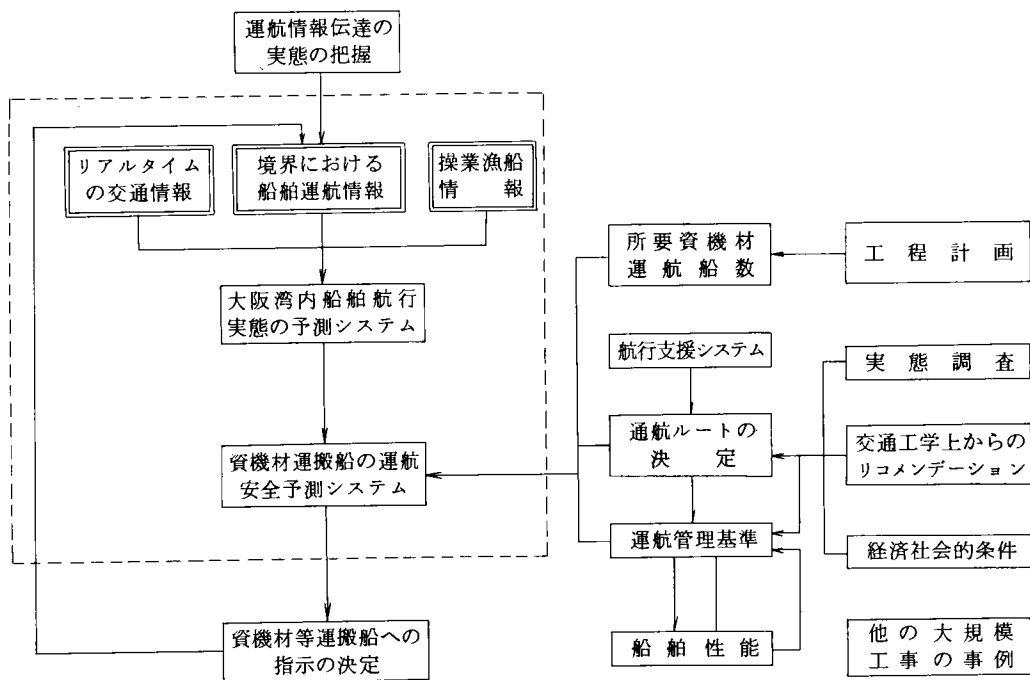


図-6.11 運航支援体制の概念図

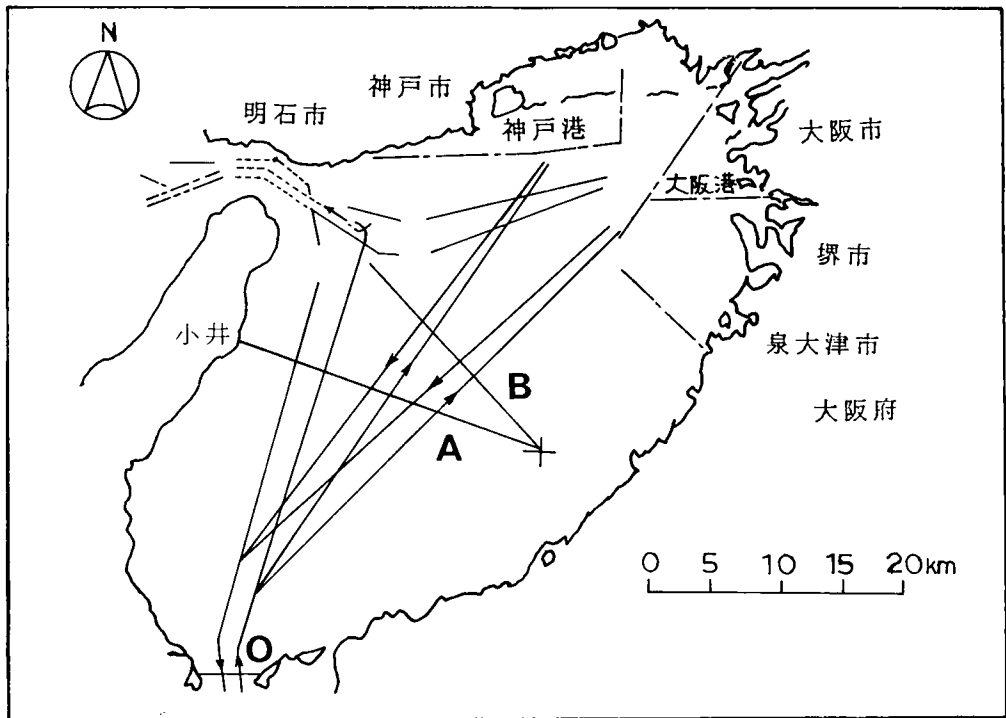


図-6.13 予測のための基線図 (O, A, B)

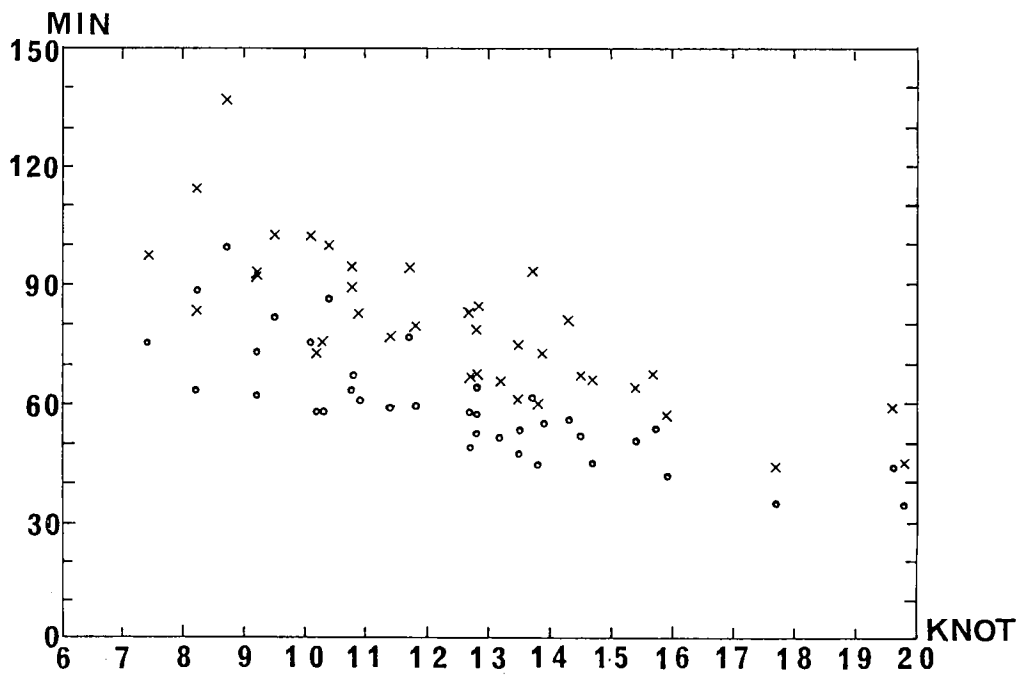


図-6.14 友ヶ島水道通過時における予測値と実際値

重ねて解析し、船種、船型、行先、季節、時間等で区分し、その区分ごとに予測式を見つけ出して、それを利用することが望ましい。

現状では、実際に境界における通過時間を知ることは難しいことから、6.2で述べた昭和54年5月29日～31日の48時間分の大阪湾海上交通船舶実態観測の結果を利用して、以上に述べてきた予測を行った。

まず初めに、友ヶ島水道から神戸港へ向う船舶に着目し、図-6.13に示されている予測のための基線を3本設けた。図-6.13において、淡路から土を運ぶ場合に土運船の航行の可能性がある空港島から淡路

島小井を結ぶ線を基線Aとし、明石以西の瀬戸内海から海砂や石材を運ぶ船舶の運航の可能性がある空港島から明石海峡を結ぶ線を基線Bとした。基線A、Bは一般船舶の通過時刻を予測しようとする基線であるが、予測する際に必要な現実データを得る基線として友ヶ島水道に基線Oを設けた。

図-6.14は、横軸に基線Oを通過する際の速力をと、縦軸に友ヶ島水道から神戸へ向けて約23km地点の、基線Aまでの所要時間を○印で、約30km地点の基線Bまでの所要時間を×印でプロットした図である。2日間の実態観測における、友ヶ島から神戸へ向った船舶は総

表-6.17 友ヶ島水道→神戸港ルートの船舶の航行時間予測

船番	船種	船種	V	da	db	ta	\hat{t}_a	$\hat{\hat{t}}_a$	tb	\hat{t}_b	$\hat{\hat{t}}_b$	$\hat{t}_a - t_a$	$\hat{\hat{t}}_a - t_a$	$\hat{t}_b - t_b$	$\hat{\hat{t}}_b - t_b$
1	1	6	19.80	22.13	29.28	33.80	36.37	36.21	44.98	47.71	47.91	2.57	2.41	2.73	2.93
2	1	8	8.20	22.16	28.85	88.27	87.82	87.55	114.47	115.21	113.98	-0.45	-0.72	0.74	-0.49
3	1	4	15.90	22.00	29.55	41.50	45.29	44.83	56.64	59.42	60.21	3.79	3.33	2.78	3.57
4	1	4	11.80	22.36	29.78	58.81	61.03	61.39	78.90	80.06	81.76	2.22	2.58	1.16	2.86
5	2	4	19.60	21.17	28.25	43.56	36.74	34.99	58.40	48.20	46.70	-6.82	-8.57	-10.20	-11.70
6	2	3	13.70	21.32	30.59	61.53	52.56	50.42	93.02	68.96	72.34	-8.97	-11.11	-24.06	-20.68
7	1	7	11.40	22.77	30.01	58.65	63.17	64.71	76.49	82.87	85.28	4.52	6.06	6.38	8.79
8	1	7	8.20	22.62	29.16	63.63	87.82	89.37	83.15	115.21	115.21	24.19	25.74	32.06	32.06
9	2	8	11.70	23.26	28.95	76.56	61.55	64.41	94.29	80.75	80.16	-15.01	-12.15	-13.54	-14.13
10	1	4	9.20	22.23	29.06	73.37	78.27	78.28	92.73	102.69	102.33	4.90	4.91	9.96	9.60
11	1	2	14.50	22.34	29.15	51.68	49.66	49.91	66.44	65.15	65.13	-2.02	-1.77	-1.29	-1.31
12	2	1	10.80	21.74	29.14	63.11	66.68	65.21	89.48	87.47	87.41	3.57	2.10	-2.01	-2.07
13	5	2	13.50	21.75	30.22	53.27	53.34	52.20	74.05	69.98	72.52	0.07	-1.07	-4.07	-1.53
14	10	9	12.70	22.72	34.67	57.96	56.70	57.96	83.07	74.39	88.44	-1.26	-0.00	-8.68	5.37
15	1	8	9.50	22.96	29.05	81.53	75.80	78.30	102.38	99.44	99.07	-5.73	-3.23	-2.94	-3.31
16	1	3	8.70	21.95	30.15	98.83	82.77	81.74	136.81	108.59	112.27	-16.06	-17.09	-28.22	-24.54
17	1	2	10.30	22.81	29.34	57.84	69.91	71.75	75.03	91.72	92.29	12.07	13.91	16.69	17.26
18	1	8	15.40	22.02	27.91	50.30	46.76	46.32	63.57	61.35	58.72	-3.54	-3.98	2.22	-4.85
19	1	2	10.20	22.96	28.75	57.93	70.60	72.93	72.12	92.62	91.32	12.67	15.00	20.50	19.20
20	1	2	12.80	22.31	28.51	52.45	56.26	56.47	66.92	73.81	72.16	3.81	4.02	6.89	5.24
21	5	2	10.80	22.09	27.93	66.80	66.68	66.26	94.61	87.47	93.78	-0.12	-0.54	-7.11	-10.83
22	1	7	13.80	22.29	28.95	44.65	52.18	52.33	59.26	68.46	67.96	7.53	7.68	9.20	8.70
23	1	7	17.70	23.12	28.87	34.57	40.68	42.32	44.23	53.37	52.84	6.11	7.75	9.14	8.61
24	1	7	10.90	22.15	29.83	61.24	66.06	65.84	82.44	86.67	88.66	4.82	4.60	4.23	6.22
25	2	7	15.70	22.74	27.28	53.64	45.87	46.92	66.91	60.17	56.19	-7.77	-6.72	-6.74	-10.62
26	1	2	12.80	21.97	29.71	57.63	56.26	55.61	77.78	73.81	75.20	-1.37	-2.02	-3.97	-2.58
27	1	7	14.30	21.38	28.13	55.63	50.36	48.44	80.25	66.06	63.73	-5.27	-7.19	-14.19	-16.52
28	1	8	12.80	21.42	28.65	63.82	56.26	54.22	83.95	73.81	72.51	-7.56	-9.60	-10.14	-11.44
29	9	2	10.40	22.21	25.72	86.72	69.24	69.19	99.89	90.84	30.12	-17.48	-17.53	-9.05	-19.77
30	2	2	12.70	22.33	29.32	48.89	56.70	56.96	66.02	74.39	74.79	7.81	8.07	8.37	8.77
31	1	6	14.70	22.43	29.27	44.86	48.99	49.43	65.26	64.27	64.51	4.13	4.57	-0.99	-0.75
32	1	8	10.10	20.72	29.92	75.64	71.30	66.46	102.16	93.54	95.97	-4.34	-9.18	-8.62	-6.19
33	2	7	13.50	22.85	28.81	47.52	53.34	54.84	60.31	69.98	69.14	5.82	7.32	9.67	8.83
34	1	5	13.20	22.37	28.45	50.83	54.55	54.90	64.69	71.57	69.83	3.72	4.07	6.88	5.14
35	1	2	7.40	22.85	29.48	75.29	97.31	100.04	97.46	127.66	129.06	22.02	24.75	30.20	31.60
36	1	5	13.90	21.75	28.20	55.15	51.81	50.69	72.00	67.97	65.73	-3.34	4.46	-4.03	-6.27
37	2	4	9.20	22.15	30.04	61.89	78.27	78.00	91.85	102.69	105.78	16.38	16.11	10.84	13.93
平均値			12.48	22.23	29.16	59.71	60.94	61.01	79.24	79.95	80.03	1.23	1.30	0.72	0.79
標準偏差			2.94	0.56	1.28	14.38	14.39	14.79	18.81	18.87	19.46	9.11	9.82	12.33	12.74

数 37 隻であった。

それら全船舶の通過時刻の予測に関する数値を表－ 6. 17 にまとめた。

表－ 6. 18 は表－ 6. 17 および実態調査で用いた船種船型のコードである。

表－ 6. 18 実態調査における船種・船型コード

船種コード	船型コード
1 貨物船	1 ～ 100
2 タンカー	2 ～ 500
3 客船	3 ～ 1000
4 フェリー	4 ～ 3000
5 水中翼船	5 ～ 6000
6 漁船	6 ～ 10000
7 特殊船	7 ～ 20000
8 曳押航船	8 20000 以上
9 その他	9 不 明
10 不 明	

表－ 6. 17 中の各記号は以下のものを表している。

V : 友ヶ島水道基線 O 通過時の速力 (ノット)。

d_a : 基線 O から基線 A までの航行距離 (km)。

t_a : 基線 O から基線 A までの航行時間 (分)。

\hat{t}_a : 基線 O から基線 A までの平均航行距離を 22.13 km として V で除して求めた航行時間の推定値。

\hat{t}_a : 基線 O から基線 A までの航行距離 d_a を V で除して求めた航行時間の推定値。

実際には d_a はわからず結果として与えられるのであくまでも参考値である。

$d_b, t_b, \hat{t}_b, \hat{t}_b$ は上の説明の基線 A を基線 B でおきかえたものである。したがって、図－ 6. 14 は、 V と t_a を○印で、 V と t_b を×印でプロットした図であるといえる。

推定値と実際値の相関度をみるために相関係数を求めると、 t_a と \hat{t}_a は 0.80、 t_a と \hat{t}_a は 0.77、 t_b と \hat{t}_b は 0.78、 t_b と \hat{t}_b は 0.78 であった。

以上に、友ヶ島水道から神戸港へ向う船舶についての予測を述べてきた。さらに図－ 6. 15 に示すように、神戸港→友ヶ島水道、友ヶ島水道→大阪港、友ヶ島水道→明石海峡、神戸港→明石海峡、大阪港→明石海峡についてもさらに C～G の 5 本の基線を設けて、同様の予測を行った。

ここで、O および A～G の基線は通過時刻を得る基線

であると同時に、その通過時刻を予測される基線でもある。おのおのの経路に対する通過時刻を得る基線、および通過時刻を予測される基線の対応関係は表－ 6. 20 の左端の経路と右端の利用基線より与えられる。表－ 6. 20 の右端の利用基線の 3 つのローマ字は、左から通過時刻を得る基線、 a の添字で表される航行所要時間を予測しようとする基線、 b の添字で表される航行所要時間を予測しようとする基線である。例えば、表－ 6. 20 の神戸港→明石海峡の経路の場合、利用基線は EGD であるから、基線 E の実際の通過時刻から、基線 G の通過時刻を予測するのであるが、EG 間の航行所要時間は a の添字の付いた $t_a, \hat{t}_a, \hat{t}_a$ であり、EG 間の距離は d_a である。次に、基線 E の実際の通過時刻から、基線 D の通過時刻を予測するのであるが、ED 間の航行所要時間は b の添字の付いた $t_b, \hat{t}_b, \hat{t}_b$ であり、DE 間の距離は d_b である。

友ヶ島水道→神戸港のケースも含めて、表－ 6. 17 の最下段に示したような、各項目の平均値と標準偏差の数値を全ケースについて表－ 6. 19 にまとめた。表－ 6. 20 は通過時刻の予測値と実際の通過時刻の相関係数および利用基線、対象隻数を記した表である。図－ 6. 14 に対応する図は省略する。

表－ 6. 19、表－ 6. 20 によると、明石海峡を通航する場合に相関係数が低くなっており、経路の設定方法、潮流の影響、船舶の輻輳によって予測値と実際値が異なることがわかる。

なお、使用したデータは、このような解析のために計画した観測の結果ではなく、6 分間隔といったこの種の解析にとっては非常に粗いものである。6. 2 で述べた手法によって、工事関連船の海上交通への影響が大なることが確認できた場合には、工事施工者は、この目的に沿った観測を積み重ねることによって予測精度を向上させて、次の段階、すなわち、正確な予測による運航支援の体制づくりに着手することが必要である。

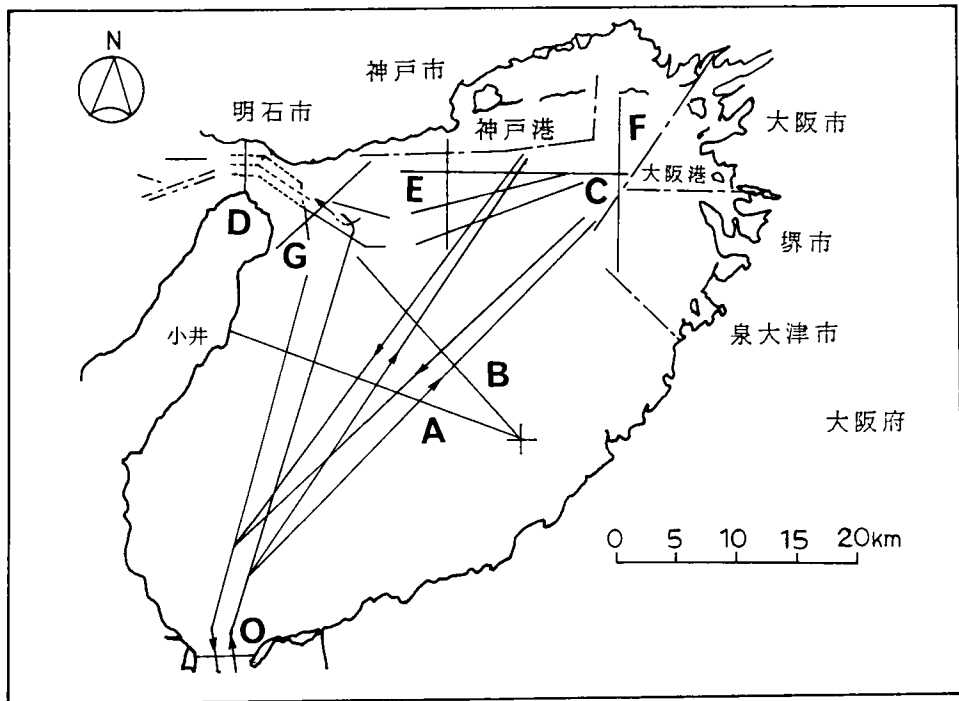


図- 6.15 予測のための基線図 (O, A, B, C, D, E, F, G)

表- 6.19 経路ごとの各値の平均値と標準偏差
(上段=平均値, 下段=標準偏差)

経路	V	da	db	ta	ta	ta	tb	tb	tb	ta-ta	ta-ta	tb-tb	tb-tb
友ヶ島水道→神戸港	12.48 2.94	22.23 0.56	29.16 1.28	59.71 14.38	60.94 14.39	61.01 14.79	79.24 18.81	79.95 18.87	80.03 19.46	1.23 9.11	1.30 9.82	0.72 12.33	0.79 12.74
友ヶ島水道→大阪港	12.52 4.20	24.45 1.05	27.46 0.28	68.26 21.13	69.78 20.67	70.06 21.85	76.99 22.69	78.36 23.21	78.63 24.15	1.52 10.92	1.80 11.23	1.37 11.66	1.64 12.59
神戸港→友ヶ島水道	12.58 3.73	12.65 1.72	20.06 1.49	36.94 15.31	35.27 9.97	35.67 11.91	57.47 21.29	55.94 15.81	56.25 17.38	-1.67 7.83	-1.27 7.20	-1.53 10.32	-1.22 8.57
大阪港→友ヶ島水道	12.08 4.33	21.30 2.28	25.38 1.94	59.15 21.09	59.03 19.95	60.11 24.70	72.72 22.76	70.34 23.77	70.67 25.26	-0.11 10.09	0.96 12.30	-2.39 15.47	-2.06 17.30
明石海峡→友ヶ島水道	11.09 2.57	19.58 3.13	41.68 3.20	60.43 13.11	60.78 16.02	60.44 16.78	121.87 17.33	129.35 34.09	129.07 33.86	0.35 17.68	0.02 13.75	7.48 33.22	7.20 31.96
友ヶ島水道→明石海峡	11.57 2.94	21.96 0.43	42.36 2.28	62.77 11.45	66.62 21.92	66.86 23.15	127.58 18.10	128.54 42.29	128.39 42.29	3.85 15.25	4.09 16.69	0.96 33.04	0.81 32.66
神戸港→明石海峡	9.84 2.49	7.92 1.53	16.85 0.81	30.10 8.59	27.68 6.55	27.53 8.10	61.11 15.22	58.86 13.94	59.01 14.98	-2.42 8.46	-2.57 8.99	-2.25 13.42	-2.10 15.56
大阪港→明石海峡	10.17 2.36	21.94 20.67	30.37 20.62	72.13 12.97	73.98 20.88	73.91 70.81	100.36 18.01	102.38 28.90	102.57 73.76	1.85 18.90	1.78 70.25	2.02 26.31	2.21 73.05

表－6.20 経路ごとの対象隻数と相関係数および利用基線

経 路	対象隻数	$\hat{t_a}$ と $\hat{t_a}$ の 相関係数	$\hat{t_a}$ と $\hat{t_a}$ の 相関係数	$\hat{t_b}$ と $\hat{t_b}$ の 相関係数	$\hat{t_b}$ と $\hat{t_b}$ の 相関係数	利用基線
友ヶ島水道→神 戸 港	37	0.80	0.77	0.78	0.78	O A B
友ヶ島水道→大 阪 港	96	0.86	0.86	0.87	0.86	O A B
神 戸 港→友ヶ島水道	39	0.89	0.89	0.89	0.92	C A O
大 阪 港→友ヶ島水道	68	0.88	0.87	0.78	0.75	C A O
明 石 海 峡→友ヶ島水道	37	0.28	0.60	0.30	0.36	D A O
友ヶ島水道→明 石 海 峡	32	0.76	0.73	0.67	0.69	C D A
神 戸 港→明 石 海 峡	49	0.40	0.42	0.58	0.47	E G D
大 阪 港→明 石 海 峡	227	0.46	0.13	0.45	0.16	F G D

6.4.4 工事区域外の土運船の航行に関する課題

一般船舶の通過時刻の予測にあたっては以下の2点が、今後の課題として挙げできる。

- I) 境界の情報をより正確に得るためには小豆島の地蔵崎、友ヶ島水道を望む海域、明石海峡、日の御崎等、最も有効な場所にレーダを設置することが望ましい。港湾周辺においては在来機関の情報を積極的に活用する方を講ずる必要がある。
- II) 境界条件が与えられてから湾内の航行船舶の航行予測を行うにあたって、航行船舶どうしが出会うことによって生じる干渉をどのような形でとり入れるか、また、その中に土運船等の連航をどのように入れていくか、段階的に検討して、効率のよい方法を順次決定していく必要がある。

6.5 埋立工事の土運船連航計画手法の開発

6.5.1 土運船連航計画情報の作成

1) 開発の目的

海上空港、沖合人工島といった大規模埋立工事においては、土運船を主とした数多くの工事関連船が、土砂積出し桟橋と埋立工事現場との間を連航する。

このとき、埋立工事現場においては、つぎの事項を検討する必要がある。

- ① 埋立工事現場における作業船舶の輻輳の程度。
- ② 輻輳の程度を小さくするような土運船等の連航経路。
- ③ 工事可能時間の増減による工事への影響。

また、土砂積出し桟橋においては、

④ 土量の供給量および供給に要する時間。

⑤ パース数。

⑥ 荷役可能時間の影響。

さらに、全体として、

⑦ 種々の計画案に対して、土運船の能力と数のバランス。

以上の検討事項を明らかにしたうえで、計画担当者に計画情報を与えることを目的として土運船連航計画情報の作成手法を開発した。作業手順としては、まず各計画案ごとに、詳細なデータを取り揃え、それらを入力データとして、本システムにより上記①～⑦について得られた情報をもとに、計画担当者が比較検討する。それによって提示した計画代替案のうちから最良の案を見つけ出す方式を考えており、システム自体が、自動的に最適計画案を探し出すようには構築されていない。そのようにすることは技術的に不可能ではないものの、現在の時点では、最適案のみが直接求められるよりも、数多くの代替案の結果が入力データによってどの様に変化するか、また、その程度を見ることに重点を置いたためである。

むしろ、この方法の方が将来における最適計画作成の自動化の際に比較検討する評価項目と評価基準が明らかにされると思われる。

2) 手法の構成

土運船連航計画に必要な計画情報を作成する本手法は、5.で扱った海上交通シミュレーションのネットワーク・シミュレーション¹⁰⁾を拡張して、それに工事計画作成手法を結合させたもので、したがって、この2つのサブシ

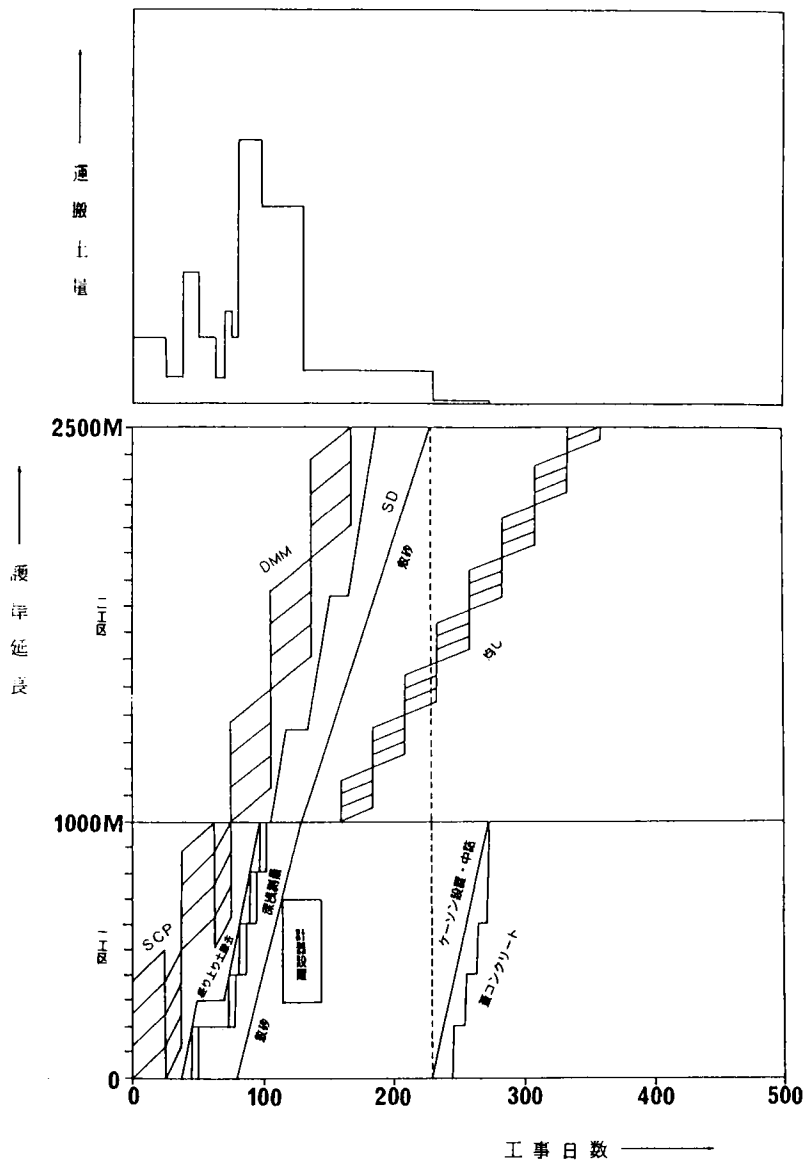


図- 6.16 工程計画と資材山積図

テムから構成される。

前者については、土運船等の運航が埋立地と土砂積出し栈橋との往復運航であることから、船舶のサイクル化の機能を付加した。

後者は、図- 6.16 の下図の形で工程を表し、対応する資源量を上図に示す工程計画作成手法である。

6.5.2 ケース・スタディ

本項では、本手法を用いて具体的に検討したケースを述べる。なお、ケースの設定をはじめとして工事に関する情報は、運輸省第3港湾建設局関西国際空港計画室に

よるものである。

1) 前提条件は、以下のとおりである。

a) 対象時間

図- 6.17 で与えられる施工計画案をもとにして、工事計画システムより与えられた結果である直投用土運船および揚土用土運船が最も多くなる工事着工後4年目を対象時期とする。図において、左下りの斜線領域、左下りの斜線領域以外のハッチを施した領域、および点を施した領域は、おのおの、護岸部地盤改良区域、護岸部に隣接した先行サンドドレン区域、および埋立地内サン

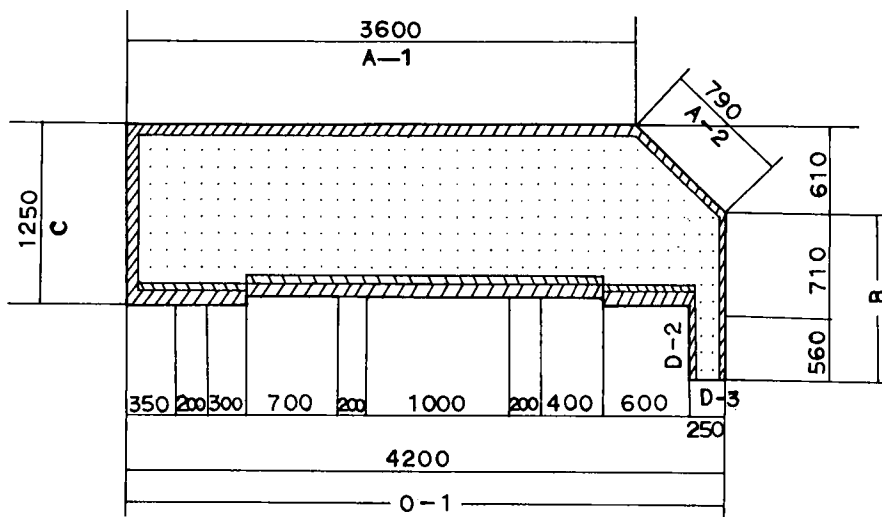


図- 6.17 施工平面計画

ドドレーン区域である。

なお、図- 6.17 は 6.2 で取扱った建設計画よりも後の計画であることから計画の条件は 6.2 における条件とは一致していない。

b) 運航経路

検討した計画案において、土運船の経路を、ネットワーク・シミュレーションの手法によって平面的に表示すると図- 6.18 のように表される。図- 6.18 において、

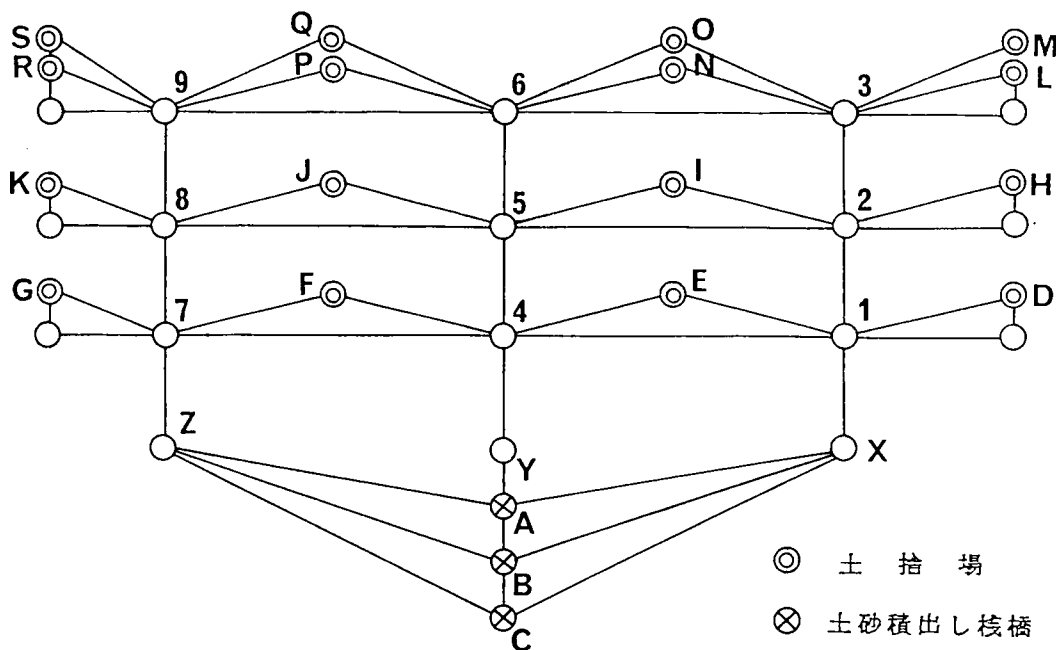


図- 6.18 土運船運航経路

⊗印は土砂積出し栈橋とし、A, B, Cの3ヶ所である。
 ◎印は埋立工事現場における土捨場であり、D, E, …
 Sの16ヶ所である。①から⑨および○の印は栈橋と土
 捨場でないネットワーク・シミュレーションのノードで
 あり、6.2で述べたように土運船等の運航経路における
 交差、合流、分岐部である。

図-6.18で、D, E, F, Gは直投1でありH, I, J, Kは直投2, 3であり、L, N, P, Rは直投4であり、M, O, Q, Sは揚土である。このように、埋立を5段階に分けたのは、不等沈下を出来るだけ少なくするためである。ここで、直投1は海底面から-14.8mまでを埋立て、直投2は-10.4mまでを埋立て、直投3は-6mまでを埋立て、直投4は-3mまでを埋立て、揚土は海面上6.2mまでを埋立てる。

なお、図-6.18の距離は正しい縮尺では表示されていない。実距離は横方向距離は図-6.18においてDと1, 1と4, 4と7がおおの700m, 7とGが370mであり、縦方向の距離は、Xと1が420m, 1とDが100m, Dと2が210m, 2とHが100m, Hと3が160m, 3とLが100m, LとMが50mである。土砂積出し栈橋A, B, Cと空港島の距離はおおの10km, 20km, 30kmとした。

また、X, Y, Zは埋立区域の出入口であるが、

タイプ1 X, Yの2か所を入口とし、出口はZの1か所のみとする。(図-6.19)

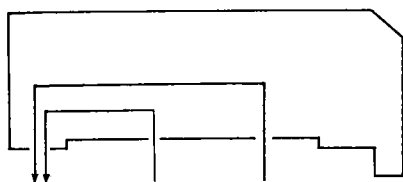


図-6.19 タイプ1

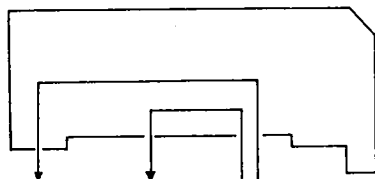


図-6.20 タイプ2

タイプ2 Xの1か所のみ入口とし、出口はY, Zの2か所とする。(図-6.20)

の2タイプの運航経路で検討した。したがって、空港島内の埋立水域では、反時計回りに経路をつけた。

c) 対象土運船

直投に供する土運船の積載量を $2,500\text{ m}^3$ 、揚土に供する土運船の積載量を $3,300\text{ m}^3$ とし、全長は一律100mとした。航行速力は、空港島外では満載時で6ノット、空船時で7ノットとし、空港島内では、おのおの、3ノット、5ノットとした。空港島内では土運船は併航をせずに前方船と最小船間距離300mをとって航行するようにした。図-6.17の数字で示される場所で、現実には運航経路の交差、合流、分岐部で、船間距離300mを保つようにした。また、そこでは満載土運船を優先させた。

d) 栈橋側の条件

土砂積出し栈橋は、空港島から10km離れた揚土用のA(揚土用土運船16隻就航)、20kmのB(直投3, 4用土運船16隻就航)、30kmのC(直投1, 2用土運船13隻就航)である。おのおの土砂積出し栈橋におけるローダ能力は、A, Bでは $10,000\text{ m}^3/\text{H}$ 、各1基、Cでは $1,900\text{ m}^3/\text{H}$ を4基とした。したがって、積込時間は、A, Cでは1船あたり約20分、Bでは約15分となるが、さらに、接岸に要する時間10分を加えた。ただし、既にバースに接岸して積込みを待つ場合の船舶の場合には接岸時間を加えないこととした。バース数は、A, B, Cおのおの6, 4, 2である。

e) 稼働時間

栈橋側の稼働時間は6時から17時までとし、空港島内の稼働時間は7時から17時30分までとした。ただし、17時30分までに空港島に到着した土運船は空港島内で作業を終えた後、土砂積出し栈橋まで戻り、そこで翌朝まで待つこととした。

f) 空港島内の作業時間

空港島内における土捨作業時間は、一律に、直投は20分、揚土は100分とした。

2) 主要な結果

ここでは、6.5.2 1)の前提条件の下での主要な結果について、6.5.1 1)の①～⑦に沿って検討する。

a) 空港島内における輻輳の程度

船舶運航シミュレーションの結果、土運船の待ちの生じた地点は表-6.21のとおりであり、輻輳度は、タイプ1, 2ともあまりかわらない。

ただし、入口における待ち時間は、入口の2つあるタイプ1の方が当然ながら待ちが少ない。

表－ 6. 21 空港島内における平均待ち時間と待ち隻数

地点	タイプ1	タイプ2
入口X	28秒(17%)	78秒(25%)
入口Y	28秒(14%)	なし
水域2	4秒(7%)	5秒(7%)
水域3	4秒(8%)	3秒(3%)
水域4	3秒(3%)	0秒(0%)
水域5	5秒(8%)	5秒(6%)
水域8	4秒(4%)	4秒(4%)
直投H	3.4分(30%)	3.0分(30%)
直投I	2.8分(23%)	1.8分(25%)
直投J	1.4分(16%)	1.3分(16%)
直投K	1.8分(19%)	1.8分(19%)
直投P	1.5分(37%)	1.5分(29%)
揚土M	60分(82%)	60分(82%)
揚土O	60分(81%)	72分(82%)
揚土Q	60分(81%)	60分(81%)
揚土S	65分(78%)	60分(78%)

b) 夜間停泊隻数

夜間作業の禁止により、埋立水域入口および土砂積出し桟橋で夜間錨泊が見られるがその隻数は、表－ 6. 22である。

表－ 6. 22 夜間錨泊隻数(日平均)

地点	タイプ1	タイプ2
A桟橋	15.25 隻	15.25 隻
B桟橋	12.25 隻	11.00 隻
C桟橋	9.25 隻	9.00 隻
開口部X	4.25 隻	9.75 隻
開口部Y	4.00 隻	なし

これより、おのおのの場所における泊地規模の必要量が算定可能であるが、この例ではタイプ1と2であまり差がない。

c) 桟橋の空き時間

土砂積出し桟橋に土運船が接岸していない場合に、ベルトコンベヤを止めるわけにはいかないことから、その

ような場合には予備の土運船を用意する必要があるが、その数を算定するために、桟橋の空き時間は重要である。ここでは、一例として、各桟橋における空きの回数とその継続時間を表－ 6. 23に示す。これはシミュレーション5日目の1日の結果である。

表－ 6. 23において、土砂積出し桟橋Aにおいては最大0.36時間、桟橋Bにおいては最大0.87時間、桟橋Cにおいては最大1.23時間の空き時間が見られる。この空き時間と各桟橋のローダ能力の積は、土運船が運びきれないで桟橋に積残される土砂の量であることから、予備の土運船の数が算定可能である。

6. 6 結言

国土の狭いわが国においては、国土の有効利用といった観点から大規模埋立工事は今後もひきつづき計画されることと思われる。その場合に、工事自体のもつ多くの技術的課題と併せて、埋立工事に不可欠な工事関連船舶の海上交通問題は、場所が船舶の輻輳する海域においては、工事遂行上重要課題となることが予想される。工事関連船舶の事故は工事の進捗の遅延のみにとどまらず、物資の輸出入の阻害を通じてわが国経済への影響は大であり、社会的影響もはかりしれない。とりわけ、最近における船舶の大型化、危険物積載船の増大傾向は、一旦事故が起きた場合の損害を、予想もつかないものとしている。したがって、大規模埋立工事に見られるような大量の工事関連船舶の海上交通問題は、事前に十分検討しておくことが強く要請されよう。

本研究は、このような要請に応えるために、工事関連船舶の海上交通への影響を事前に評価するとともに、その対応策をも探る目的でなされたものである。しかし、対応策に関しては、最も単純といえる工事施工側である工事関連船の規制のみに絞り、他の一般船舶の規制を考えない方策をとっている。これは、はじめから一般船舶の規制を安易に考えずに、第一段階においては、まず一般船舶の側は工事によって何らの影響も受けない方策で検討し、その結果、一般船への規制の必要性が判明してから、一般船への規制を取り入れる第二段階に着手しようという意図によるものである。この点に関しては、6. 4が中心であるが6. 4はその概念を予備的に考察したに

表－ 6. 23 桟橋の空いている回数と継続時間

桟橋	タイプ 1						タイプ 2					
A	4 回	0.01	0.06	0.01	0.36		1 回	0.31				
B	5 回	0.73	0.11	0.19	0.35	0.18	6 回	0.87	0.10	0.57	0.04	0.03 0.04
C	6 回	1.04	0.02	1.03	0.03	0.06 0.12	5 回	1.23	0.81	0.03	0.02	0.06

過ぎず、今後の課題であり現在も本研究を続けている。
本章は、その骨子を示した。

関西国際空港関連の調査研究は、既に第三港湾建設局
関西国際空港計画室から関西国際空港株式会社に引き継
がれ、現在でも数多くなされている。土運船等の運航問
題に限っても、海上交通影響調査、海上交通対策調査お
よび工事管理システム調査（これは工事全体の管理を含
んでおり、したがって、土運船等の管理も含んでいる）
が挙げられる。筆者らが行った本研究における実態観測
については文献 1）に、シミュレーションの結果につい
ては文献 2）に、詳細な記述がある。これらの成果は、
今後ひき続いて計画される大規模埋立工事の土運船等工
事関連船の運航問題に大きく貢献するよう集大成に向っ
て研究活動を推進していく基礎となると思われる。

参 考 文 献

- 1) 大阪湾船舶航行実態調査，運輸省第 3 港湾建設局，
1980 年。
- 2) 大阪湾における海上交通の輻輳度解析調査，運輸
省第 3 港湾建設局，1981 年。
- 3) 奥山育英：工事関連船の海上交通への影響，昭和
57 年度港湾技術研究所講演会講演集，1982 年，
pp.187～225。
- 4) 奥山育英：大規模埋立工事における土砂等資材運
搬船の運航に関する研究，土木計画学研究発表会講
演集，1983 年，pp.623～632。
- 5) 海上交通安全調査報告書，日本海難防止協会，
1984 年。
- 6) 奥山育英：海上交通シミュレーションの開発と応
用，昭和 54 年度港湾技術研究所講演会講演集，
1979 年，pp.197～248。
- 7) 奥山育英，藤原 哲：海上交通のマクロ評価シミ
ュレーション，第 6 回電算機利用に関するシンポジ
ウム講演概要集，土木学会電算利用委員会，1981 年，
pp.21～24。
- 8) 奥山育英：ネットワーク・シミュレーション，航
海 第 80 号，日本航海学会，1984 年，pp.20～
27。
- 9) 奥山育英，佐藤恒夫，中西克也：港湾工事等にお
ける工程計画作成手法の開発と応用，土木計画学研
究発表会講演集，1983 年，pp.633～637。
- 10) 奥山育英，佐藤恒夫：座標式工程表による工程計
画手法の開発，港湾技術研究所報告，第 23 巻 第 3
号，1984 年，pp.187～234。
- 11) 関西国際空港工事管理システム調査 ― 工事管理

- システム調査報告書，日本埋立浚渫協会，1984 年。
- 12) 奥山育英：埋立工事の土運船運航計画システム，
土木計画学研究，講演集，1985 年，pp.421～424。
 - 13) 藤井弥平：序説海上工学，博文堂，1971 年。
 - 14) 早藤能伸：東京湾口を航行する船舶相互間の位置
関係に関する解析，港湾技術研究所報告，第 22 巻
第 1 号，1983 年，pp.97～117。
 - 15) 海上交通安全システムに関する調査研究，日本海
難防止協会，1979 年。

7. 水域計画シミュレータの開発と応用

7.1 緒言

前章までに、海上交通の実態観測と解析、海上交通で主役になる船舶の寸法に関する解析、水路の容量についてのマクロ的な理論、交通流をマクロ的に評価する海上交通シミュレーション、およびその応用ともいうべき大規模埋立工事における工事関連船の運搬計画、いずれも、海上交通を大局の見地から考察する計画担当者の必要とする計画情報を取扱ってきた。

実際、現実の海上交通計画においては、未知の部分が多過ぎることから、また、社会から要請される計画への期待が、どちらかといえば細部にこだわらずに全体に対して寄せられることから、計画担当者は余り徹視的でなく巨視的な計画情報を必要とすることが多かった。

しかし、全体的な計画が関係者の了解を得て実行に移る段階になると、より詳細な情報を必要とする。例えば、海上交通において新たな交通管制を計画しようとするときには、計画全体としては、新たに必要な施設、管制によって影響を受ける船舶の隻数、船舶どうしの出会い回数の減少、航行時間の増減等が問題となる。これらの問題が結着すると、管制待ちの船舶が安全に待機できる水域の検討、航行援助施設の量と質と設置場所、出会いの際の適正可航幅の確保等、より詳細な計画がひき続いて計画担当者に要請される。

本章では、海上交通計画におけるより詳細な計画情報を計画担当者に提供することを目的として開発した水域計画シミュレータについて述べる。まず、導入時に調査した操船シミュレータに関する一般的な事項、次に水域計画シミュレータの概要、最後に、この装置の水域計画への応用の展望を扱う。

7.2 水域計画シミュレータの開発

7.2.1 概説

航路・泊地計画等の水域施設の計画および航路の航行方法に関する計画を、水域計画とよぶと、航路の幅・水深・方向の計画、泊地の広さ・形状・アプローチ方法の計画、航路網の交通体系の計画等は水域計画である。これらの水域計画は、水域を利用する船舶の船種・船型および操縦性能によって著しく変動し、計画を策定することが非常に困難である。運輸省港湾局で決めている技術基準においても、水域施設の編にあっては、「望ましい」、「考慮することとする」、「適切に定めるものとする」、「慎重に定める」、「適切に計画する」、「…の場合はこの限りではない」といった表現が多い。基準の文章にしても「長い航路にあっては」、「交通量の多い場合は」

と述べられてはいるものの、長い航路といったときの長さや交通量の隻数が具体的に記述されていない。また、基準の内容にしても、最近のV.L.C.C.に見られる巨大船・コンテナ船・P.C.C.・液化ガス船等の新型船にはそのまま適用するには対応付けが難しく、現実には関係者の意見を聴取した上で計画を作成している。これらの点は、基準が不備と言うよりも、予算上の制約と危険の限界まで挑戦できないといった安全上の制約から実船実験で確かめることが不可能であるといった宿命によるものともいえよう。

しかし、最近の科学技術の進展は目覚ましく、実船と性能がほとんど変わらない船舶操縦シミュレータが開発され、航海士の訓練や教育に利用されるようになった。その結果、実船では不可能な実験も、シミュレータを利用することによって、可能になった。この船舶操縦シミュレータに手を加えて水域計画シミュレータを開発し、実船さながらの実験を行い、水域計画策定の際に必要な計画情報を得ることを試みた。

船舶操縦シミュレータは、操船シミュレータとも呼ばれるが、当初、巨大船建造計画における船舶性能の追求のために開発され、その後、その精度の素晴らしさから、航海士の教育・訓練にも利用されるようになり、訓練専用のシミュレータも開発されるようになった。精緻な操船シミュレータは、そのパラメータの数が多くしかもノウハウに属して明らかにされず、また、視覚部の装置が非常に大がかりであるため、非常に高価で、世界的にも設置台数は多くない。しかし、本格的シミュレータはその運動モデルが精密であり、視覚再現部を含む操船感覚が実船に非常に近いことから、最近、欧米諸国を中心として港湾計画への応用という新たな展開がなされはじめた。

このような趨勢において、港湾計画の研究分野においても積極的にこの手法を取り入れて研究を進めるため、操船シミュレータを基にして水域計画専用のシミュレータを開発した。

水域計画シミュレータは、物理現象の解明における模型実験と同じ性質のものであり、水域計画の策定にあたって、シミュレータの航跡記録等の解析により、操船者の指示に基づく船舶の挙動の定量的な計測を可能とするものである。

7.2.2 水域計画シミュレータの概要

1) 操船シミュレータ

水域計画シミュレータは、操船シミュレータを基本としていることから、ここで内外の代表的な操船シミュレータを概観し、操船シミュレータの特徴をみる。

東京商船大学に設置されている船舶操縦シミュレータは、運動モデルとして2階非線型微分方程式が用いられ、外力条件は、浅水影響（シャロウエフェクト）、側壁影響（バンクエフェクト）、タグボート、風、潮流を考慮している。視覚部については、水平角が220度の点光源によるパノラマ投影方式が採用されている。

神戸商船大学の操船シミュレータは、運動モデルとして加減速時における操船特性を考慮したモデルが用いられ、視覚部はテレビカメラおよびプロジェクタを利用する方式がとられている。

石川島播磨重工（IHI）の操船シミュレータは、運動モデルとしては流力モデルを採用し、視覚部としては、背景、自船、他船、ブイをプロジェクタで映写し、波頭を16mm映画で写しだす合成方式を採用している。

国内の操船シミュレータでは、このほかに、大阪大学に浅水影響、側壁影響、風、潮流を考慮したシミュレータが、また、広島大学にアナログコンピュータを使用し、視覚部は点光源方式のシミュレータが設置されている。

国外の操船シミュレータとしては、スウェーデンの海事研究センターが1967年に設置しており、外力条件として波、風、潮流等を可能とし、視覚再現方式として、ブラウン管7台を使用するCGI（Computer Generated Image）方式をとっている。

英国航海大学には、浅水影響およびタグボートを考慮でき、夜間16点光源による視覚部を持つシミュレータがある。

米国では、世界最大規模といわれるCAORF（Computer Aided Operations Research Facility）が、1976年に多くの外力条件を考慮できるCGI方式による操船シミュレータを設置している。

ドイツにはSchool of Maritime Studiesに振動台上にブリッジを備えつけたシミュレータが設置されている。これは、船舶の操船、視覚に加えて船舶のローリング、ピッチングの揺れをも考慮したものである。

以上の操船シミュレータから、その構成要素または機能面について以下の分類が可能である。

運動計算部の装置には、デジタルタイプとアナログタイプのコンピュータの2タイプがあり、さらにデジタルタイプの場合、16ビット以下のものと32ビットスーパーミニコンの2種類が使用されている。

視覚再現方式には、

- i) CGI - プロジェクター方式、
- ii) CGI - TVスクリーン方式、
- iii) TVカメラ - プロジェクタ方式、
- iv) 点光源 - 影絵方式、

v) フィルム・スлайド - 投影方式、

vi) これらの組合せによる方式

等がある。

船舶の基本運動モデルに、次の外力条件のいくつかを考慮しているが、同時にすべてを考慮しているものは見当らない。外力条件としては、

- i) 浅水影響、
- ii) 側壁影響、
- iii) 通過船影響、
- iv) 風、
- v) 潮流、
- vi) 波、
- vii) タグボート、
- viii) サイドスラスト

等がある。

上記の例から、操船シミュレータの特性として、

- i) 外力条件を含む運動モデルが複雑であること、
- ii) 視界が全方向のものが望まれること、

さらに、他の交通機関のシミュレータに比べ

- iii) 船舶の場合、操作に対する装置の応答が極めて遅いこと等が挙げられる。

表-7.1に内外の代表的操船シミュレータを示す。

水域計画シミュレータの基本部分を形成する操船シミュレータの導入にあたって、これらの調査結果をもとにして、さらに目的および予算をも勘案して、次のことがらを考慮した。

- i) シミュレータモデルは、システムとしての信頼性が高く、出来得れば現に操船訓練等に使用されており、実績のあるものであること。

- ii) シミュレートの場合である対象港湾あるいは対象水域施設が、シミュレータに固有のものではなくいかなる代替計画案に対しても適用可能となるように、場の設定条件が汎用性を有すること。

- iii) シミュレータの外力条件に、風、潮流、波が設定可能であること。また、他船の航行を許すこととし、さらにこれらについて、シミュレーション実行中、ダイナミックに設定・変更が可能であること。

- iv) シミュレータによる操船実験記録から、計画のための各種の解析が可能であること。

以上のことがらを勘案して導入した水域計画シミュレータは、

- i) 運動モデルは、IHI製の操船シミュレータと同一である。

- ii) 視覚再現部は、CGI方式とし、カラーグラフィック・ディスプレイにより平面図描画方式である。

表-7.1 世界の代表的な操船シミュレータ

設置機関	国名	設置年	目的 *1	自船 モデル数	機能外乱 *2	視界再現方式	スクリーン	
							方式および大きさ	画角 Horizontal Vertical
CAORF	米 国	1976. 1	A	10	S,B,N,O,W,-,T	C.G.I	円筒 9m(半径)×4m(高)	H 240° V +10° -14°
M S I	"	1976. 11	B	5	S,-,-,-,W,-,T	模型-T V	7.6m(半径)	H 140°
Ship Analytics	"	1980. 4	A, B	7	S,B,N,O,W,C,T	C.G.I	円筒 3.8m(半径)×1.4m(高)	H 180° V 20°
MITAGS	"	1981.	B	-	S,B,N,O,W,C,T	夜間: スポット投影 昼間: フィルム投影	球面 1.5m(半径)×1.2m(高)	H 360°
サザンブトン Warsash 商船大学	イギリス	1. 1977. 3 2. 1981. 2	A, B	10	S,-,-,-,W,C,T	スポット	平面 4m(幅)	H 100° V +22° -27°
CARDIFF	"	1982. 初	A, B	6	- - - - -	C.G.I	円筒 4m(半径)	H 120° V 30°
ワーゲンゲン NSMB 研究所	オランダ	1. 1970. 11 2. 1976. 11	A, B	10	S,B,N,O,W,C,T	点光源影絵	円筒 11m(半径)×8m(高)	H 360° V +25° -15°
デルフト T N O 研究所	"	1968. 4	A, B	9	S,-,-,-,W,C,T	点光源影絵	平面 10m(幅)×3m(高)	H 120° V 28°
ソエステベルグ T N O 研究所	"	1976. 1	A	-	S,B,-,O,W,C,-	模型-T V		H 120° V +10° -20°
王立 オランダ海軍大学	"	1975. 8	B	1	- - - - -	スポット		H 140°
ブレーメン商船大学	西ドイツ	1975. 3	B	5	S,-,-,-,-,-	フィルム投影	平面 6m(幅)×2.5m(高)	H 120° V +20° -20°
SUSAN ハンブルグ商船大学	"	1982. 3	A, B	4	S,B,N,O,-,-,T	C.G.I	円筒 1.35m(直径)	H 250° V 15°
スウェーデン 海事研究センター	スウェーデン	1967.	A, B	-	S,B,N,-,W,C,T	C.G.I	平面	H 120° V 15°
ノールウェイ SMS トロントハイム	ノールウェイ	1979. 7	A, B	3(6)	S,B,N,-,W,O,T	夜間: スポット投影 昼間: フィルム投影	球面 10m(半径) 40m×7.5m(高)	H 240° V +15° -18°
I.H.I 田無工場	日 本	1975. 6	A, B	3	-,-,-,-,W,C,-	フィルム投影	平面 7m(幅)×3.5m(高)	H 100° V +30° -30°

*1 A: 研究
B: 訓練

*2 S: シャロー
B: バンク
N: ナロー
T: タグ

O: 他船
W: 風
C: 潮流

出典: 世界の操船シミュレータの現状,
日本船長協会, 1983年8月

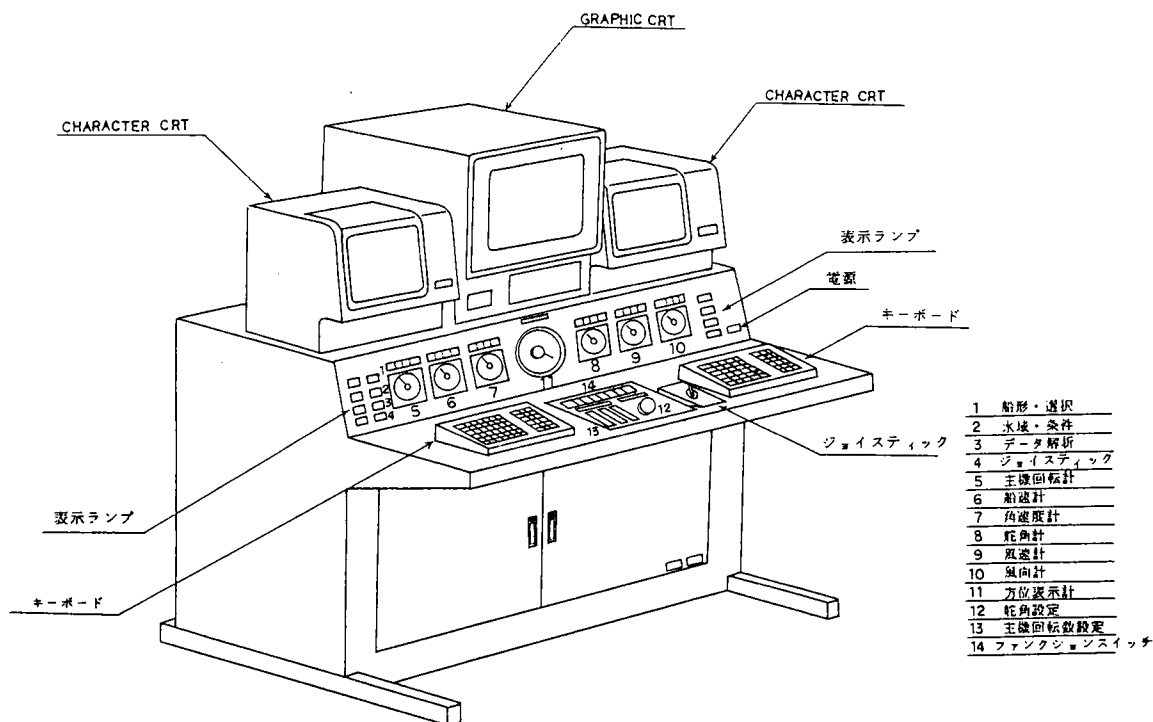


図-7.1 水域計画シミュレータ

iii) 模擬操作記録ならびに運動経過について即座に、
解析図面が得られるデータ解析システムと一体化し
ている。

などの特徴を有している。

水域計画シミュレータの外観を図-7.1に示す。

2) 水域計画シミュレータの構成

水域計画シミュレータは、船舶の船橋（ブリッジ）に
おける操舵、主機操縦等の操船動作に伴って生じる船舶
の運動を模擬再現し、これに基づいて、計画対象水域施
設の形状、規模等計画要素を解明・分析し、あるいは、
水域施設計画を利用船舶の操船者の視点から評価するも
のである。

水域計画シミュレータの概念を図-7.2に示す。

本シミュレータは、設定部Ⅰ、設定部Ⅱ、制御部、計
算部、表示部、記録部Ⅰ、記録部Ⅱおよびデータによ
って構成される。

以下に各部の機能及び構成機器の概要をまとめる。

i) 設定部

設定部は、その目的と用途から設定部Ⅰと設定部
Ⅱに二分される。

① 構成機器

キーボード付キャラクター・ディスプレイ 2台

② 機能

（設定部Ⅰ）

1. 地形データの作成
2. シミュレーションのための地形の設定、変更
3. モデル船舶の選択
4. 自船および他船の初期位置の設定
5. 航行経路位置の設定
6. シミュレーション結果の解析の制御

（設定部Ⅱ）

1. 外力Ⅰの設定および表示

ii) 制御部

① 構成機器

コントロール パネル 1台

② 機能

1. 船舶操縦シミュレーションの開始・中止
2. 船舶操縦シミュレーションのプレイバック
3. 自船運動の制御（シミュレーション中）
4. 他船運動の制御（シミュレーション中）

iii) 計算部

① 構成機器

CPU（メモリー内蔵） 1台

磁気ディスク 2台

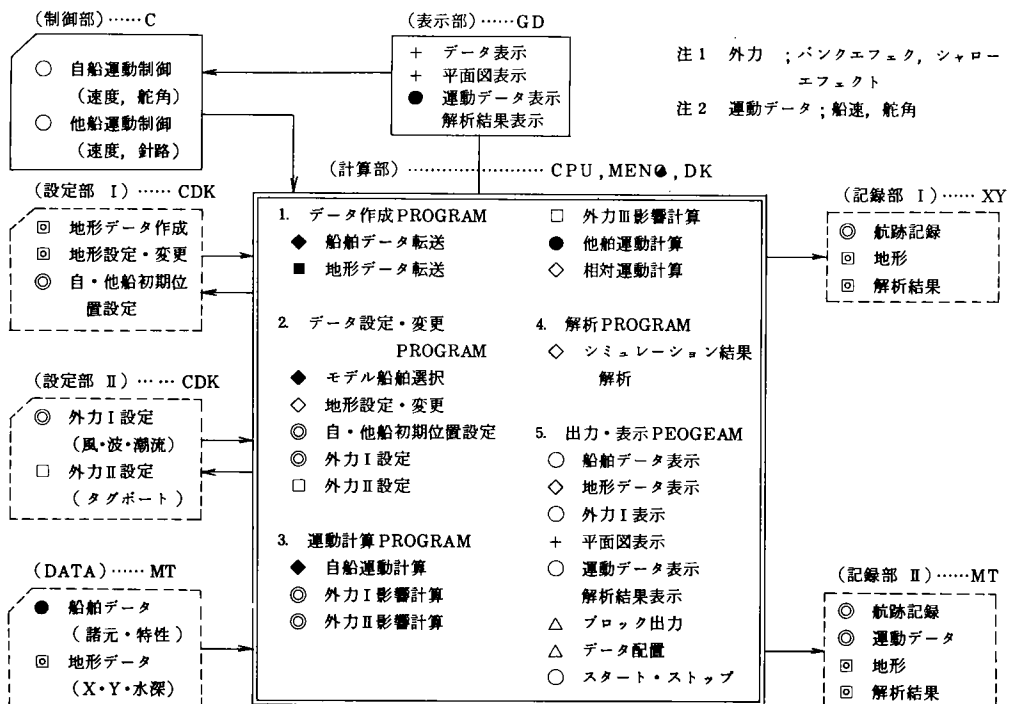


図-7.2 水域計画シミュレータの概念

② 機能

下記プログラムによる演算，およびシミュレーション実施中のデータの保存を行う。

1. 船舶データ転送プログラム

選択されたモデル船舶に関するデータを磁気ディスクに転送する。

2. 地形データ作成プログラム

地形データを作成あるいは修正して磁気テープに格納する。またシミュレーション時には，地形データを磁気ディスクに転送する。

3. モデル船舶選択プログラム

設定部Ⅰのキャラクター・ディスプレイに船舶データファイルのタイトルを表示し，モデル船舶の選択を行う。

4. 地形データ設定・変更プログラム

設定部Ⅰのキャラクター・ディスプレイに地形データファイルのタイトルを表示し，地形データを設定するとともに地形の変更を指示する。

5. 自・他船初期位置設定プログラム

自船および他船の初期位置を設定する。

6. 外力Ⅰ設定プログラム

外力Ⅰをシミュレーション中随時設定する。

7. 自船運動計算プログラム

自船運動制御による平面内の船体運動を模擬計算する。

8. 外力Ⅰ影響計算プログラム

外力Ⅰによる船体運動への影響を計算し，自船運動に加味する。

9. 他船運動計算プログラム

他船運動制御指示に基づいて他船の位置を計算する。

10. 相対運動計算プログラム

自船，他船および地形の相対位置を計算する。

11. シミュレーション結果解析プログラム

船舶操縦シミュレーションの結果から，計画対象水域施設の計画要素と，操船動作あるいは船舶運動との関連について解析する。

12. 船舶データ表示プログラム

キャラクター・ディスプレイ（設定部Ⅰ）に，船舶データファイルのタイトル，船種，船型等を文字表示する。

13. 地形データ表示プログラム

キャラクター・ディスプレイ（設定部Ⅰ）に水域施設名および計画対象水域施設に係るデータ（座標値等）を文字表示する。

14. 外力Ⅰ表示プログラム

グラフィック・ディスプレイ（表示部）およびキャラクター・ディスプレイ（設定部Ⅱ）に風向・風速・流向・流速を文字表示する。

15. 平面図表示プログラム

グラフィック・ディスプレイ（表示部）に下記の内容を平面図形表示する。

- 地形（計画対象水域施設を明示する）
- 自船の位置，船首方位
- 他船の位置，船首方位

16. 運動データ表示プログラム

グラフィック・ディスプレイ（表示部）およびキャラクター・ディスプレイ（設定部Ⅰ）にそれぞれ下記の内容を文字表示する。

（表示部）

船速 舵角，船首方位，回頭角速度，主機回転数

（設定部Ⅰ）

他船との相対距離・方位，目標物との相対距離・方位，経過時間，増減速回数およびその位置，転舵回数およびその位置

17. 解析結果表示プログラム

シミュレーションの解析結果をグラフィック・ディスプレイに図表表示する。

18. プロット出力プログラム

下記内容をXYプロットに図表出力する。

- 航跡および地形
- 解析結果

19. データ記憶プログラム

航跡記録，運動データ，地形等シミュレーション結果およびその解析結果を磁気テープに格納する。

20. 開始，中止プログラム

シミュレーションのスタート，ストップおよびブレイバックを制御する。

Ⅳ) 表示部

① 構成機器

グラフィック・ディスプレイ 1台

② 機能

1. 地形，船舶位置等の表示
2. シミュレーション解析結果の表示

Ⅴ) 記録部

記録部は，その目的，用途により2分される。

① 構成機器

XYプロット 1台

磁気テープ 1台

② 機能

(記録部Ⅰ)

1. 航跡記録および地形の図表出力
2. シミュレーション解析結果の図表出力

(記録部Ⅱ)

1. 航跡記録, 運動データ, 地形等シミュレーション結果の格納
2. シミュレーション解析結果の格納

7.2.3 水域計画シミュレータの操作方法

1) 実験方法の概要

シミュレーション実行過程は、図-7.3のとおりである。図で、破線枠内が計画与件、自然条件および評価等を表し、実線枠内が水域計画シミュレータの操作を表す。

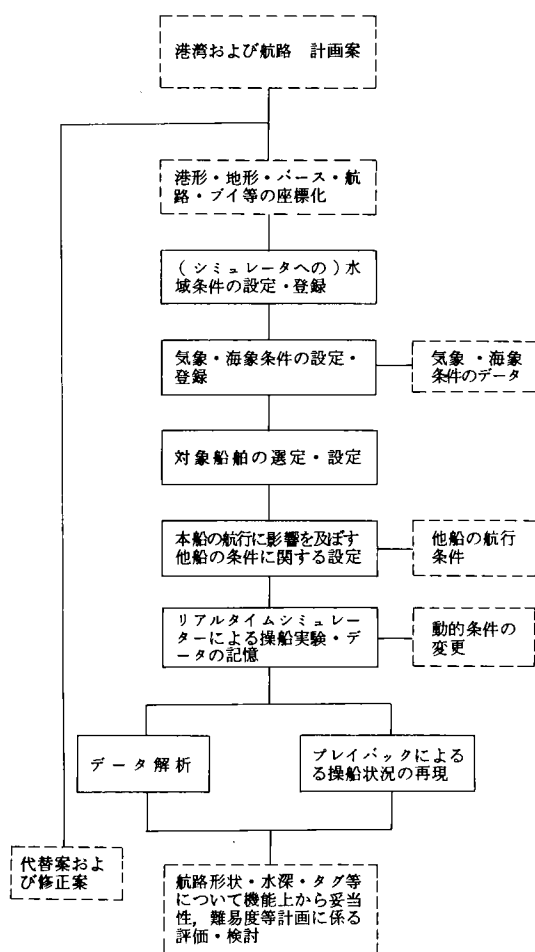


図-7.3 シミュレーション実行過程(実線枠内がシミュレータを使用)

まず、港湾計画に基づき、水域施設、外郭施設、係留施設の法線計画代替案がシミュレーションの条件として与えられる。これらの計画図面を座標読取装置によって座標データとし、これらを水域条件データとして、入力するとともに内部に記録・登録する。水域条件設定と同時に、入力出港時における気象・海象条件データをあわせて登録する。

次に、船舶条件については、自船と他船に分けて考える。自船は、対象船型、操縦性能等のデータを新たに設定し、または既在のデータを選定し、シミュレータ内部に記録・登録する。他船は、経路および速力を時系列の形で設定する。

操船実験は、以上の条件を設定してから、自船の主機および舵操作を行って、所定の出入港操船等を実施する形で行われる。実時間で模擬される運動結果およびすべての操船操作は、磁気テープに記録される。

実験結果の記録は、各種の解析に使用される。場合によっては、プレイバックにより操船状況の再現にも利用される。

以上の実験および解析の終了後、これらに対する評価を行う。必要であれば、計画を修正して、再度、初めから実験を繰り返す。なお、図-7.3の実線で示す枠内の作業は、おのおのを単独で実施することが可能である。

2) 条件の設定

シミュレーション条件の設定は、コンソールパネル上の“水域条件”ボタンを押すことにより、水域条件設定プログラムが起動し、“水域条件”ボタンのランプが点灯し、データ入力に関する応答が準備されたことを操作者に知らせる。同時に、キャラクタディスプレイとキーボードによる対話による応答が始まる。

(1) 水域条件の設定

防波堤、ベース、航路等の具体的水域条件の設定は、対話で、最初に要求してくる項目である。ディスプレイ上に表示される下記4種類の作業内容のうち1つを選択する。

- i) 新たに港の基本航路パターンを作成する。
- ii) 既に登録済みの基本航路パターンのタイトルを表示する。
- iii) 実行可能な実航路パターンを作成する。
- iv) 既に登録済みの実航路パターンのタイトルを表示する。

地形を含んで水域施設パターンは、20ケースまで登録可能である。既に登録されている水域施設パターンを使用する場合は、登録番号により指定する。なお、パターンは二重構造になっており、湾形に対応する基本航路

パターンとシミュレーションの代替案に対応する実航路パターンの2種類がある。実航路パターンはシミュレーション実行時の設定水域条件そのものである。

ii) またはiv) を選択するとそれぞれの登録済みパターンのタイトルを表示し、現在、選択されているパターン番号がマーキングされる。必要に応じ、マーキング番号を変更することで、水域条件の設定が変更される。

i) の指定によって、地形・航路・防波堤等の図形データを、グラフィック入力する。すなわち、ジョイスティックレバー&タッチボタンを操作することにより、ディスプレイ上のカーソルおよびカーソルの座標を見て、直接図形データを入力し、水域条件の設定を行う。カラー・ディスプレイ上には、入力した地形、防波堤等が逐次表示され、その確認を行うことができる。

iii) の指定によって実航路パターンの作成・変更および設定・登録等の作業の指示を行う。実航路パターンを作成するものになるパターンとしては、基本航路パターンおよび実航路パターンのいずれでも指定可能である。このとき同時に設定条件のうち、シミュレーション時間、シミュレーションの計算時間間隔、操船に関する評価式に基づく計算の有無の指定、開始時の自船の位置・船首方向・初速等も設定する。

(2) 気象・海象条件の設定

気象・海象条件は、風向・風速、波向、波高、潮流(方向・速さ)について、実航路パターン設定時に、その中の気象コントロールの中で指定する。時系列データにより、5つの時間帯まで設定可能である。

(3) 他船の設定

他船の設定は、同時に最大6船まで可能とした。

1船ごとにコースと速力を指定することにより他船を航行させる機能である。この場合、操船結果によって他船のコースと速力をリアルタイムで変更することが可能である。

(4) 対象船舶の選定と設定

対象船舶は、20種類まで登録可能である。現時点で登録されている船種・船型は3種類で、それらは、

- i) 450,000 重量トンタンカー、フルロードコンディション
- ii) 200,000 重量トンタンカー、フルロードコンディション
- iii) 60,000 重量トンバルクキャリア、フルロードコンディション

である。

船型の若干の変更あるいは浅水影響に対しては、舵面積の変更により、代用することが可能である。船舶設定

の具体的な操作方法是コンソール制御盤上の“船舶設定”ボタンを押すことにより、そのプログラムを起動して行う。この時、コンソール上部のキャラクタ・ディスプレイ画面上に、次の作業内容が表示され、その選択を要求してくる。

i) 磁気テープに登録されているデータの中から、該当する船舶データ(パラメータ)をシミュレータに登録する。

ii) 既登録の船舶データのそのタイトル表示および船舶データの選定を行う。

iii) 既登録の船舶データの一部を変更する。

iv) 既登録の船舶データをプリンタに印字する。

これらに関する基本的な操作方法是、いままで述べてきた方法と同様であるから、以下、設定条件内容のみを詳述する。

i) を選択した場合は、船体形状に関する諸元

- ① 全長
- ② 水面上投影面積
- ③ 水面上投影面積
- ④ 前方投影面積
- ⑤ 後方投影面積

ならびに主機回転数

- ① 前進5段階(NAV. FULL, FULL, HALF SLOW, SLOW, DEAD, SLOW)
- ② 後進4段階(FULL, HALF SLOW, SLOW, DEAD SLOW)

と対応する速力を設定し、磁気テープのデータとともにシミュレータに登録する。

iii) を指定した場合には、既登録の船舶データのうちの舵形状

- ① 舵高さ
- ② 舵幅
- ③ 舵面積
- ④ 舵アスペクト比

および舵の応答特性

- ① 時定数
- ② 最大舵角

等のデータを変更・認定・登録する。

3) 実行およびプレイバック

水域条件、船舶条件その他の条件がすべてが設定されるとシミュレータの操船が可能となる。実行に先だってシミュレータ自身の初期設定を行わなければならない。シミュレータの初期設定は、コンソール上の“準備”ボタンを押すことにより行われ、約1分後、準備のための計算が終了すると、コンソール上の“休止”ランプが点

灯しスタンバイ状態となる。

“開始”ボタンのセットにより、開始ボタンが緑色に点灯し、実行に入る。実行中は、カラーグラフィック・ディスプレイ上に、実航路パターンと自船および他船を2秒間隔でフラッシュ更新しつつ表示するほか、ブリッジの航海計器である。

- ① 自船の針路を表示するジャイロレベーター
- ② 主機回転計
- ③ 船速計
- ④ 回頭角速度計
- ⑤ 舵角計
- ⑥ 風向計
- ⑦ 風速計

等のメータに、これら諸量がリアルタイムで表示され、さらに経過時間がデジタル表示される。

シミュレータ操作者は、これらの機器、計器を参照しつつ、入出港のコースに沿って航行するための操船操作を行う。

シミュレーション実行途中における条件の変更は、操縦者以外の実験担当者によって行われる。変更可能な条件は、

i) 気象・海象条件の変更

ii) 他船の航行ルート、針路、速力等の変更

の2つで、コンソール上の“データ変更”ボタンを押すことにより、データ変更プログラムが起動される。この場合、自船の船舶運動計算が中断されることなく、操縦者は何らの干渉を受けない。これらの変更は、キャラクター・ディスプレイ上に表示される会話形式の応答により変更が行われる。

シミュレーションの終了は、シミュレーション経過時間が、シミュレーション(上限)タイムを越えた場合に自動的に停止し終了する。そのほか、操舵コンソール上の“休止”ボタンを押すと中断し、そのあと再開しなければ、終了する。

操船操作、ならびに船舶運動に関するすべての実行記録は、磁気テープに格納される。この磁気テープは、模擬操船の再現にも利用される。すなわち、コンソール上の“プレイバック”ボタンを押すことにより、グラフィック・ディスプレイの上には航路パターンと自、他船が表示され、コンソール上の航海計器が記録どおり動く。

4) 解析・評価

MTハンドラに実行経過が記録されている磁気テープを装着した状態で、操舵コンソール上の“データ解析”ボタンを押すと、キャラクターディスプレイには、下記の作業メニューを表示し、選択の入力要求をする。

i) 航跡図の作成

ii) 解析グラフの作成

iii) データ項目の時系列表の印字

航跡図の作成は、シミュレーションの時間帯、スケール、作図エリア、タイムマーカ時間間隔等の作図パラメータを入力することにより、X-Yプロッタに航跡図が自動的に図化される。

ii)の場合は、1枚のグラフに横軸を時間軸とし、縦軸に最大5変量を自動的にプロットする自動作図プログラムが作動する。この場合の作図パラメータは、シミュレーション時間帯、縦軸・横軸のスケールおよび範囲をグラフ化しようとする変量ごとに指定する。

iii)の印字は、プリンタに経過時間帯ごとのデータ項目を作表するもので、内容的には、ii)と同一のものである。

5) 操船手順

シミュレータの演算部を構成しているミニコンピュータは、PDP-11/24で、複雑な船舶運動を計算するのみならず、システム全体を統括制御している。シミュレータ実行時には、ミニコンの走行状態にあり、これらを含む操船シミュレータに関する操作手順を以下にまとめる。

1. 定電圧装置パワーサプライ

2. コンピューターの起動

① キャラクタディスプレイパワーオン

② CPUパワーオン

③ ディスク装置

Ⓐ ディスクパワーオン

Ⓑ システムディスクセット

Ⓒ シミュレータディスクセット

Ⓓ ディスク『LOAD』ランプ点灯

Ⓔ ディスク『READY』ランプ点灯

④ CPU起動

⑤ 日付・時間のセット

3. シミュレータ・プログラムのLOG-ON

4. グラフィックディスプレイ、ラインプリンタ、X-Yプロッタ、MTのパワーオン

5. 操舵コンソールパワーオン

6. シミュレータイニシャルセット

7. 船舶設定

8. 水域条件設定

① 水域条件ボタン

② ジョイスティックボタン

③ ジョイスティックレバー&スイッチ

9. 実行

- ① 準備ボタン
- ② 開始ボタン
- ③ 休止ボタン
- ④ データ変更ボタン

- 10. プレイバックボタン
- 11. データ解析ボタン
- 12. シミュレータ実験終了

7.3 水域計画シミュレータの計画への適用

7.3.1 概説

水域計画において、航行中の船舶の正確な動きを知ることが重要である。しかし、それを予測することは極めて困難である。海上の交通の場である港内や航路では、潮流・風・波があり、船舶の航行はこれらの影響を大きく受ける。さらに、操船者がそのつど判断を下した結果が最終的な船舶の動きとなることから、船舶は航行のたびごとに異なった航跡を描く。このような困難の中で、水域計画は、過去の実績および海事関係者との調整等により進められ、定量的根拠を示すに足る分析手法が開発されていなかったことから、定性的な判断にゆだねられていたといえよう。しかし、水域計画シミュレータの利用により、より定量化された分析手法を開発することが可能となった。水域計画に水域計画シミュレータを適用するにあたっては、次の2つの方法が考えられる。

第1に、個々の具体的な水域計画について、船長や航海士等の船舶操縦経験者による模擬実験を実施し、施設形状等に関する評価検討を積み重ねて形状等の評価を直接行う方法である。この場合、模擬実験のデータを多数収集することにより、操船パターンの把握に努め、操船パターンをある程度把握することにより、航海士の資格を持たない者による操船実験も可能となって汎用性が増すことも考えられる。

第2は、水域計画シミュレータによって、実船では実験不可能な船舶の性能テストを数多く行い、船舶の性能を完全に把握し、それを基にして計画を評価する方法である。この方法の評価は、第1の方法によるチェックによって可能である。

本節では、まず第1の例としてタイ国マブタブット港の計画を、第2の例として水域施設計画の基準策定手法に関する提案を取り上げて、水域計画シミュレータの応用を展望する。

7.3.2 マブタブット港建設計画への適用

1) マブタブット港について

計画中のタイ国マブタブット港は、北緯12度39分、東経101度10分に位置する。

計画によると、1987年に年間推定貨物取扱量387.33

万トン、2000年に年間推定貨物取扱量2,299万トンを見込んでいる。バース関係施設として、短期計画で13バースで延べバース長1,750m、2000年には45バースで延べバース長5,750mを想定する遠大な計画である。この中に、20,000～60,000 DWT級バース、および60,000～150,000 DWT級バース建設の計画がある。

マブタブット港の計画図は、図7.4に示すとおりである。図中、破線が航路であり、斜線部が大型船用繫留バースである。航路を挟む黒い太線は、東西の防波堤と護岸である。防波堤で囲まれた領域内の細い線によって小型船用バースおよび二次計画バースが示されている。また、着工前の海岸線は図の上部の折れ線である。

2) 調査の目的および概要

本調査の目的は、この港湾開発計画で航路法線、同形状、航路幅を決定するに先立ってこの港湾を利用することが想定されている20,000 DWTから150,000 DWT級の撒積船の操船面からの検討を加えることにある。

約6 kmの延長をもつ外港および内港航路に対し、原計画では

20,000 DWT級船舶の場合、125 m規模

60,000 DWT級船舶の場合、185～200 m規模

150,000 DWT級船舶の場合、200～250 m規模

の航路幅員が想定されていた。この航路に船舶が出入港する場合の限界的な自然条件としては波浪が港外では2 m、港内1 m、潮流は1ノット、風速は25ノット以内という条件が想定されていた。

上記のような条件の下で、航路条件を想定して、操船の難易度を検討しようとするものである。

このような問題が与えられたことに対して、水域計画シミュレータを用いて検討を加える。

3) 水域計画シミュレータによる検討

(1) 対象船舶

本調査で使用するシミュレータの船舶のタイプは、以下のとおりとした。

計画においては、150,000 DWT 撒積船は出入港の対象とするものの満載状態は想定されていないこと、60,000 DWT 撒積船の場合は満載状態での出入港を考慮することから、シミュレータ対象船としては、上記条件に近いバナマックス型の撒積船（満載状態）を使用した。

シミュレータに使用した本船の諸元を表7.2に示す。

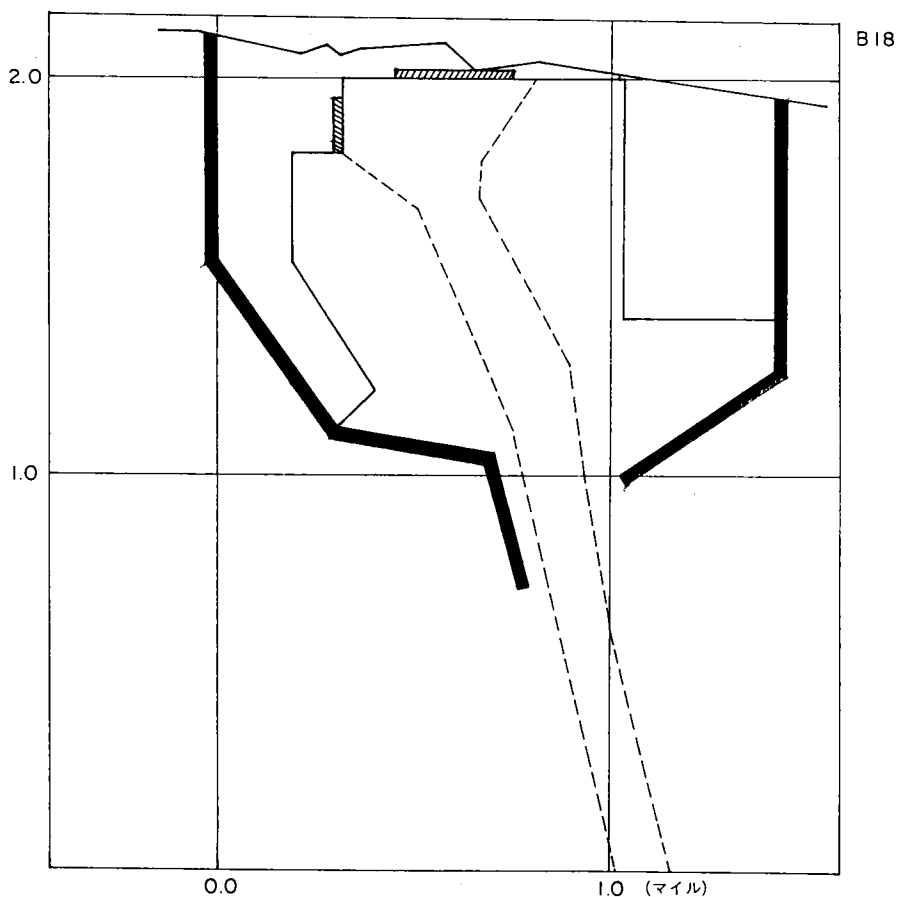


図-7.4 マブタプット港計画図

表-7.2 実験船の諸元

HULL		ENGINE			RUDDER	
LENGTH	223 m	TYPE	TURBIN		HIGHT	820 m
LPP	213 m	NOR-RPM	13000.011 P		BREDTH	530 m
BREDTH	32 m	NOR-RPM	123 RPM		AREA	41.77 m ²
DEPTH	18 m				ASPECT	3.09
DRAFT	13 m					
DISP	77,727.0 TON	mode	rpm	speed	D-TIME	2.0 SEC
					LIMIT	6.0 DEG
OVSIDE	1,538 m ²	N. FULL	128	15.0 KT		
OVFRNT	516 m ²	FULL	100	12.0 KT		
UNSIDE	2,827 m ²	HALF	70	9.0 KT		
UNFRNT	427 m ²	SLOW	40	6.0 KT		
		D. SLOW	20	3.0 KT		

(2) 水域条件の設定の方法

計画法線は図-7.4のとおりである。航路幅に変更のある種々の代替案の中で、本調査では防波堤開口部外側で185mおよび200mの2案について実施した。この2案の差異は、航路東側の位置の変更のみである。

実験時に、自船の状況を容易に判断可能とするため、視覚部における配色は次のとおりに定めた。

自 船 : 黄色(5角形・ヘッディング有)
 外郭施設 : 白色
 バース : 黄色
 護 岸 : 緑色
 海岸線 : 橙色

これらのデータは、次のプロセスで水域計画シミュレータに入力した。まず、A1サイズの法線計画図面を座標読取装置を使用し読みとった。その座標をパーソナルコンピュータを使用し、水域計画シミュレータの座標系での数値に変換し、座標数値列を作成した。続いて、水域計画シミュレータに組込まれている水域条件設定プログラムを使用し、グラフィックディスプレイ、キャラクターディスプレイ、ジョイスティック等を利用し、線の種別、カラーおよび座標等を数値で入力し、水域条件を設定した。

(3) 気象・海象条件の設定

気象・海象条件として、風および潮流を設定した。風は、防波堤内外あるいは着岸時の港内奥部を問わずいたるところ一様な強さで吹くものとした。潮流は防波堤外側でのみ流れがあらわれるものとして設定し、これらを同時に考慮した。

(4) シミュレータ操作者

大型船の操船を操縦未経験者が行うということは、お

よそ不可能と考えざるを得ない。したがって、ここで行う計画航路の評価あるいは妥当性の検証として模擬操船を行うに当たっては、長年にわたる外航航路就航経験者をもって実験にあたることとした。シミュレータ操作者は船長経験者であるのみならず、この種の調査におけるシミュレータの操作経験者でもあることが望ましい。当該実験においては、上記要件を満たす船長経験も永いパイロット有資格者が行った。

(5) シミュレータ実験結果およびその考察

本項における主要なテーマは、実行時におけるシミュレータ実行条件、およびシミュレータの実行結果(実行記録)そのものである。

航路幅、航路形状等に関する操船上の評価あるいは計画の妥当性については、上記実験結果に基づいて港湾計画者、海上保安庁等関係諸官庁、パイロット、その他海事関係者を含む多方面の専門家による検討がなされるものとする。

シミュレータによる模擬実験は、リアルタイムで動くシミュレータの性質上、長時間の実験を必要とする。

ここでは実験に関する種々の制約の中で効率的な実験を行うため、表-7.3に示す5ケースに的を絞って実施することにした。

それらは、入港1ケース、出港4ケースである。

今回の実験では、操縦の中にタグアシストが付かないので、それを前提とする着岸部分は操船実験に含めていない。

表-7.3 模擬実験ケース一覧

ケースNo.	入出港 の 別	船 型 (G/T)	航路幅 (M)	バース	コース (DEG)	初 速 (KT)	風向(DEG) 風速(KT)	潮流方向(DEG) 潮流速力(KT)
ケース0	入 港	PANAMAX 60,000	200	—	350	8.0	22.0 10.0	292 1.0
ケース1	出 港	〃	185	AGバース	180	1.5	WSW 20.0	112 1.0
ケース2	出 港	〃	185	NEバース	180	1.5	WSW 20.0	292 1.0
ケース3	出 港	〃	185	AGバース	180	1.5	NNE 20.0	292 1.0
ケース4	出 港	〃	185	NEバース	180	1.5	NNE 20.0	112 1.0

i) 入港操船

図-7.5に入港操船実験ケースNo.0の結果を示す。このケースは、防波堤外側の航路幅が200mであり、気象・海象条件は風向22度から風速10ノット、潮流が292度方向へ1ノットである。初速8ノットで港外から入港し、バース前面のターニングベースンで微速のまま、着岸形勢で実験を終了したものである。図-7.5の航跡図から船は潮流を打ち消すため、船首を進路右側に傾けたまま、速力を次第に落としながら防波堤開口部まで進み、ここからは、風の影響のみを考慮して、航路屈曲部をゆるやかに左旋回し、一層速力を落として目標地点に到達している。図中、OSはスタート時の自船の位置を示し、航跡の途中に経過時間を分単位で示してある。航跡にはほぼ平行で短い線が突き出ているのは、船首方向を記したものである。航跡全体をみると航路中央部をスムーズな曲線を描いて目標地点まで到達している。

このケースの操舵記録をみると、経過時間が10分までの間に、最大舵角を発令したのは1回限りで、約8分～9分の間に操舵されている。同様に、減速のための主機回転数に関する発令は、経過時間17分～21分前後の間に逆回転50～70 R.P.M. がなされている。(図-7.6参照)。

ii) 出港操船

出港操船は、バース離岸後、バース前面のターニングベースンでタグアシストによる回頭終了直後の体勢から模擬実験を開始し、その後の操船ではタグアシストが無いという条件で出港している。出港の実験は4ケース実施したが、バースにより、風および潮流の条件を変えたものである。なお、表-7.3からも分かるように出港の場合、航路条件は入港ケースでの航路幅200mから185mへと厳しく設定している。時刻0で本船の向きを真南にし、初速1.5ノットに設定して実験を開始した。

ケース1は風向WSW、風速20ノット、潮流は真北から右回りに112度1ノットで行った。ケース2はケース1の潮流の方向が292度に変えたものであり、ケース3はケース2の風向をNNEに、そしてケース4はケース3の潮流の方向を112度にそれぞれ順次変更したものとなっている。ケース1からケース4までの模擬操船結果の航跡図を図-7.7、図-7.9、図-7.11、図-7.13に示す。このうちケース1では、防波堤開口部を通過したあたりから航路端に寄りすぎて航行しているが、これは、操作者が十分に実験船の特性に馴れていなかったこと、および潮流が若干港内側まではいり込んだことによる。このことは、ケース2以後はすべて航路内を順調に航行していること、ならびに実験後の操作者の意見から推察

したことによる。

これら4ケースの操舵記録は図-7.8、図-7.10、図-7.12、図-7.14に示すとおりである。最大舵角である35度をとっているのは速力がほとんどない最初の5分間までであり、その後は最大で25度前後の舵角である。

なお、これらの他に、経過時間、速力、船首方位、主機関設定回転数、設定舵角、X座標、Y座標をはじめとする200項目に及ぶ模擬実験結果の出力が可能である。

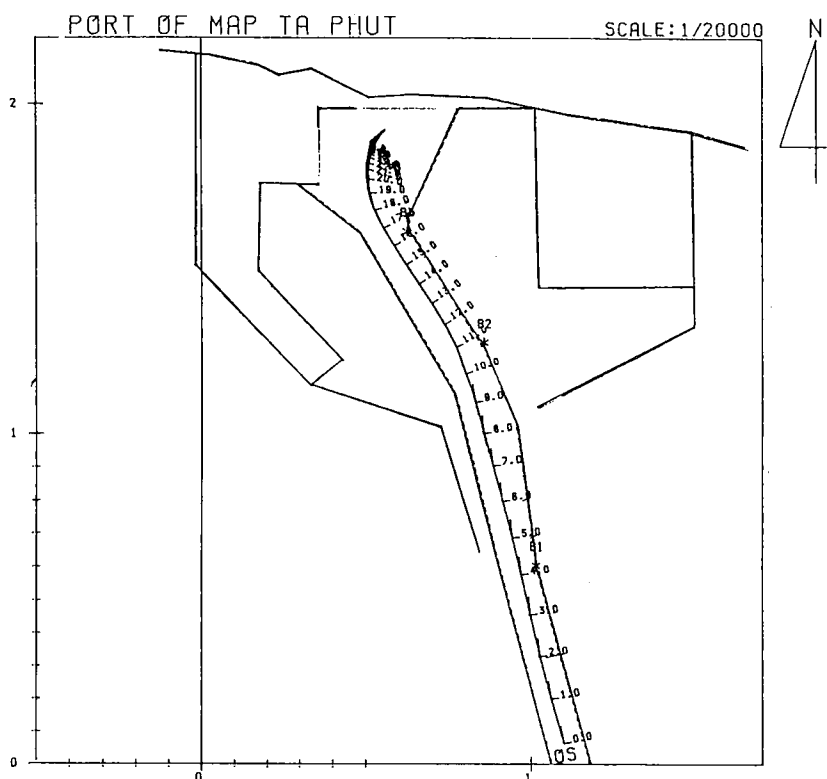


図-7.5 入港・航路図(ケース0)

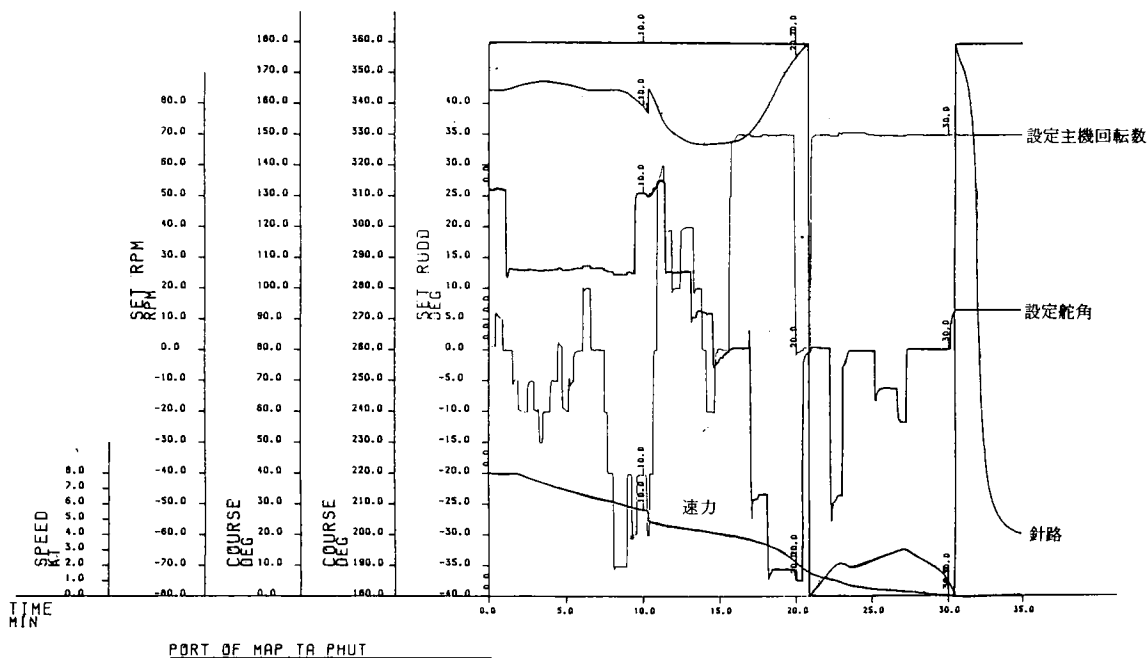


図-7.6 入港・操舵角等記録(ケース0)

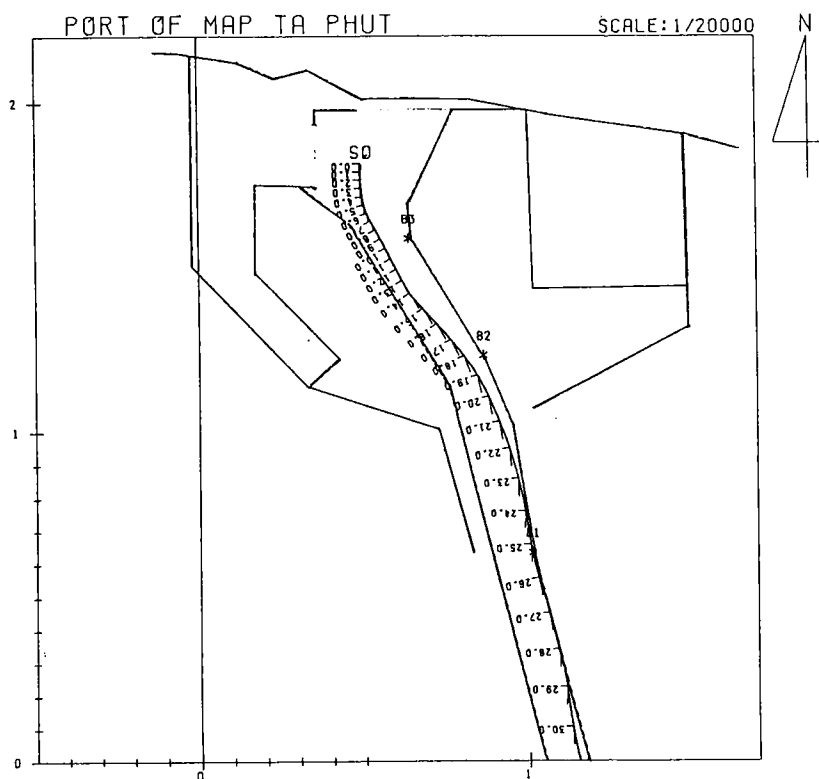


図-7.7 出港・航路図(ケース1)

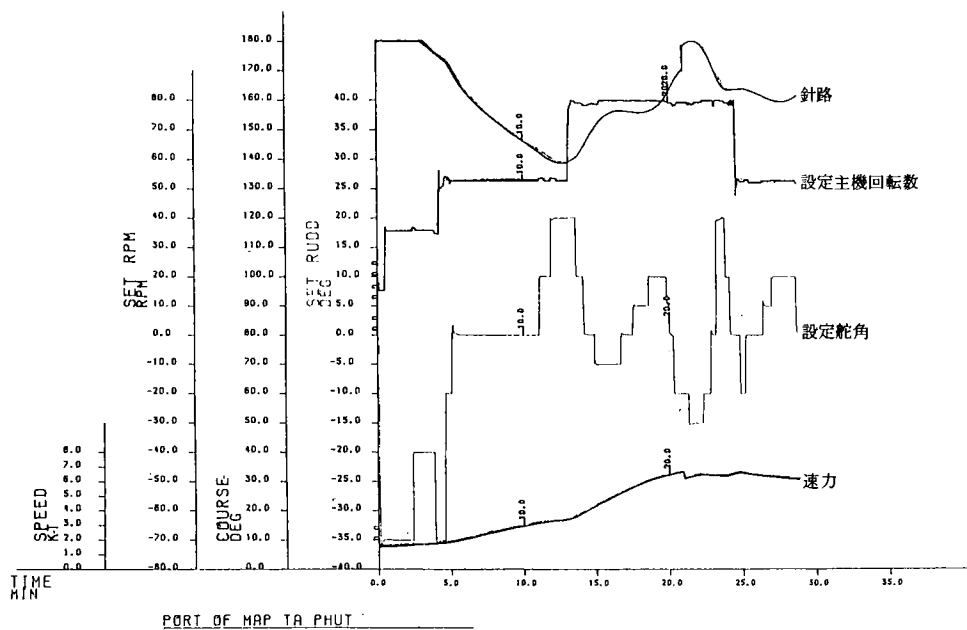


図-7.8 出港・操舵角等記録(ケース1)

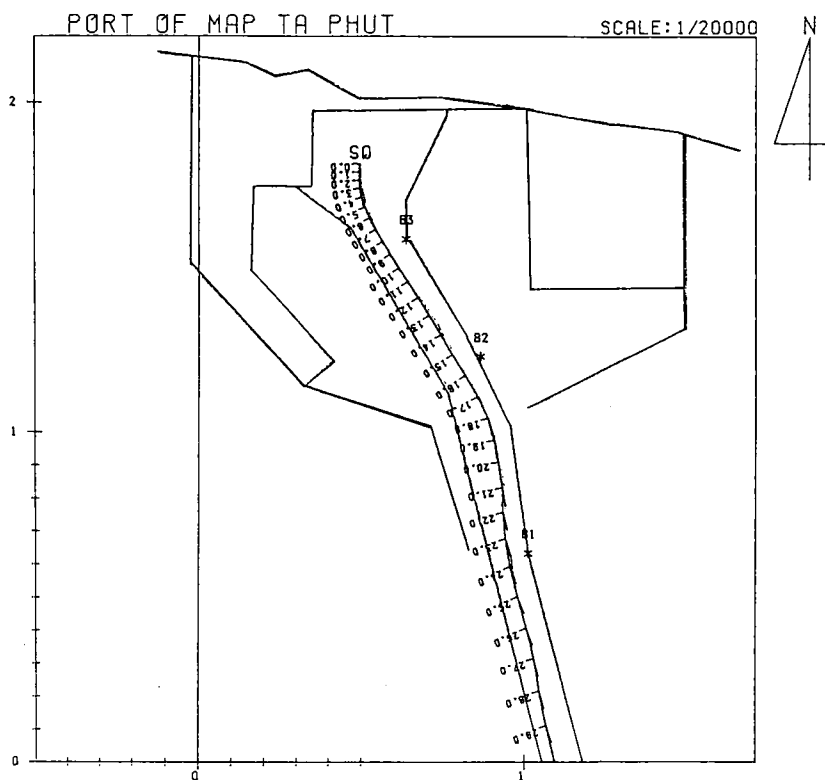


図-7.9 出港・航路図(ケース2)

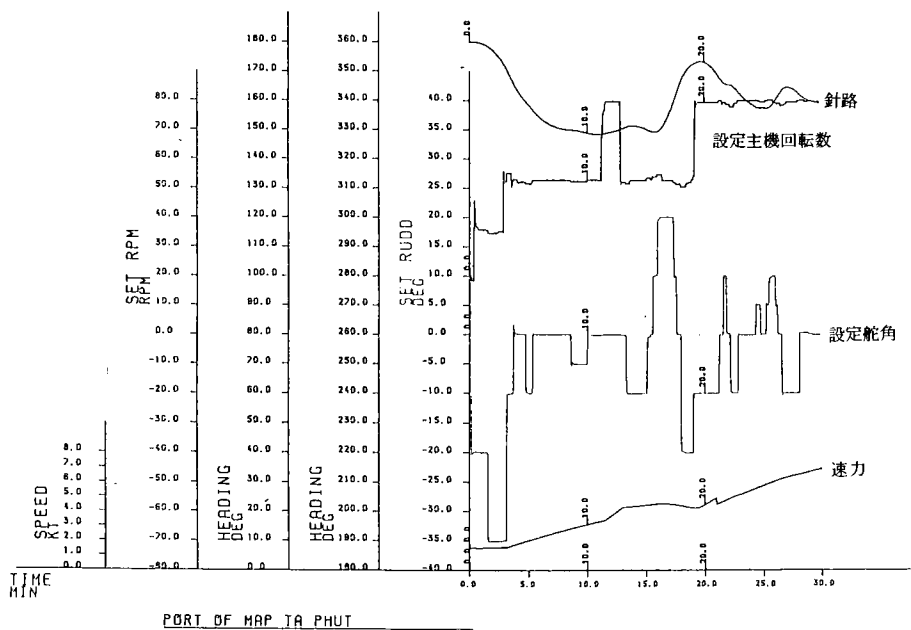


図-7.10 出港・操舵角等記録(ケース2)

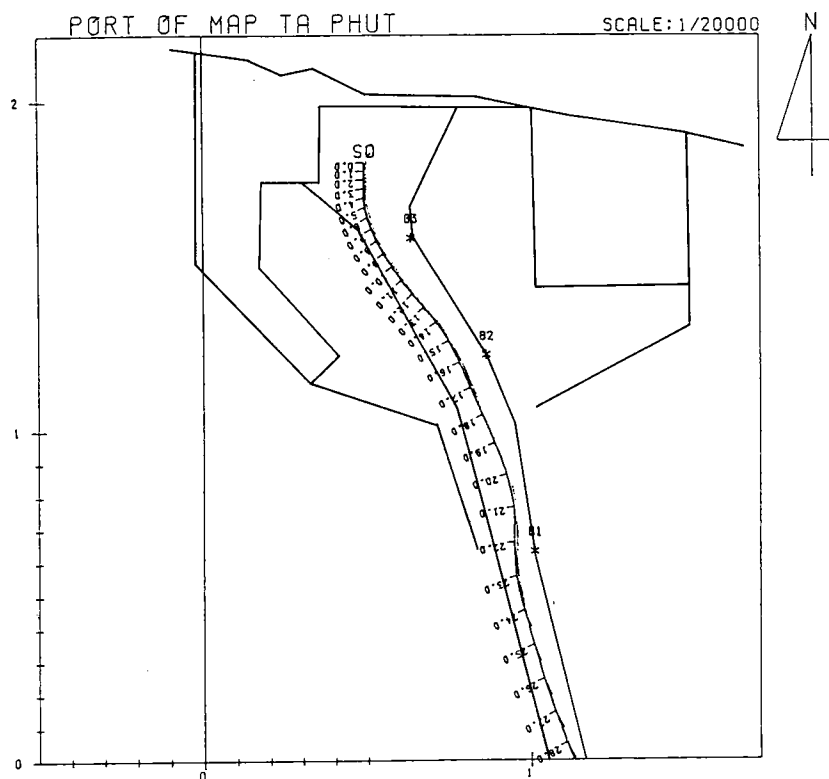


図-7.11 出港・航路図(ケース3)

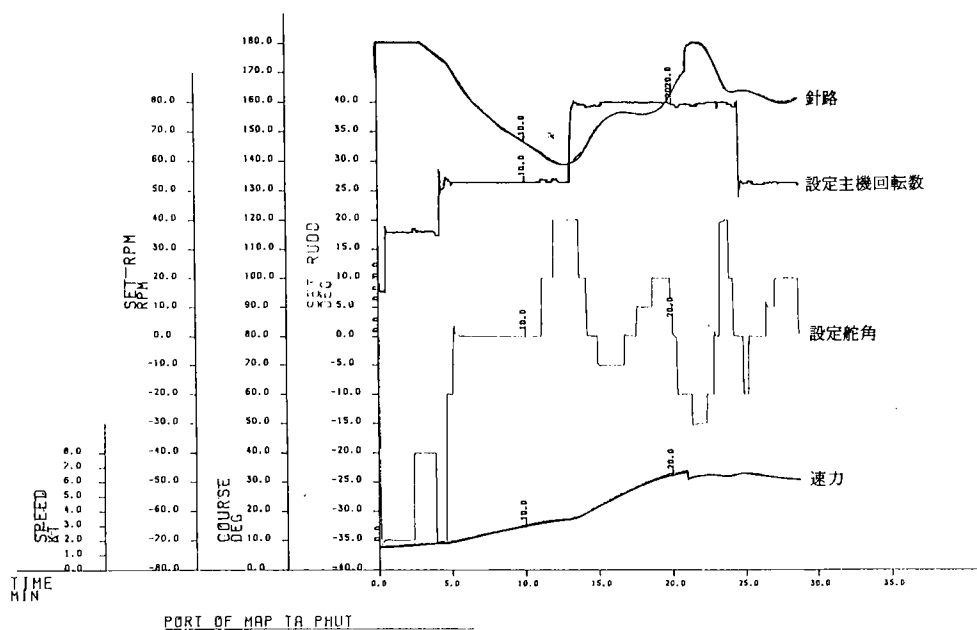


図-7.12 出港・操舵角等記録(ケース3)

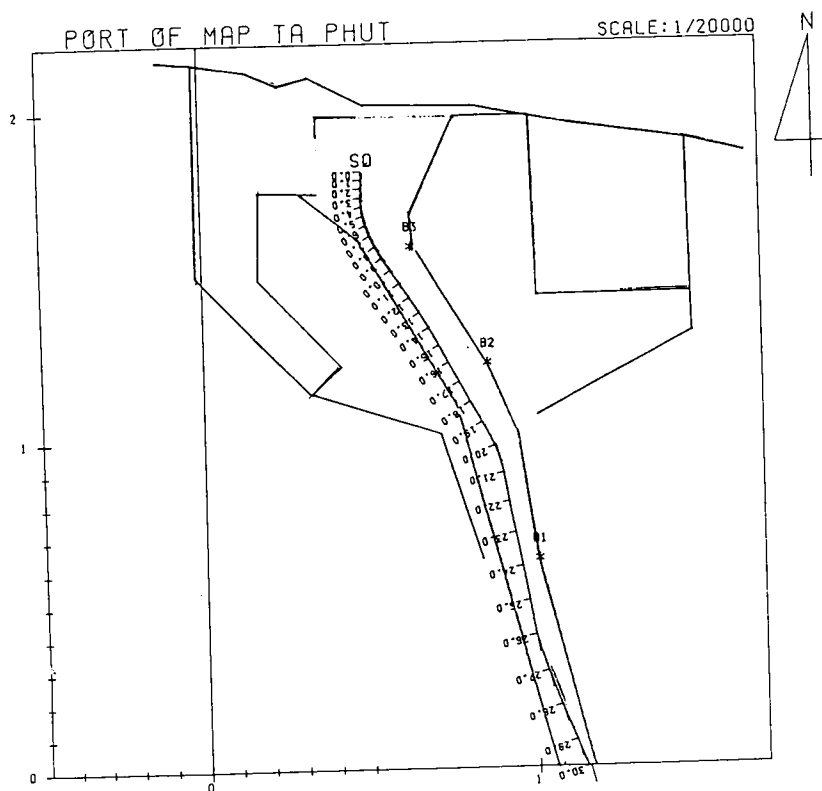


図-7.13 出港・航路図(ケース4)

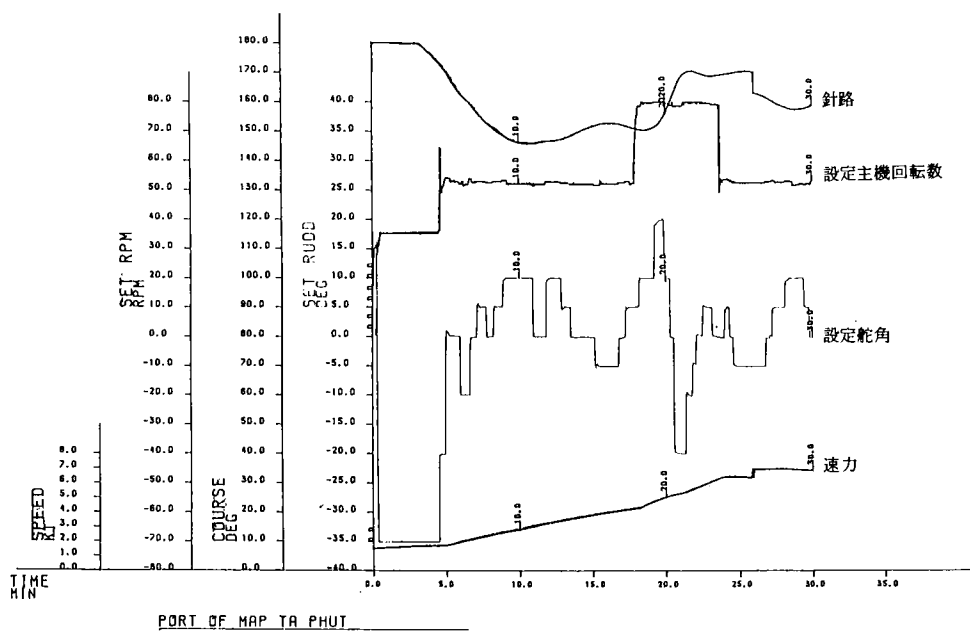


図-7.14 出港・操舵角等記録(ケース4)

7.3.3 水域施設計画の基準策定の展望

1) 概説

水域計画シミュレータは、リアルタイムで動作することにより、マンマシン系として機能し、操船感覚も実際の操船に近づく。入港操船の実験にあっては、速力を遅くさせることから、1ケース2時間以上を必要とする場合も多く、1日に数ケースしか実験ができない。船長有資格者による航行難易度に対する定性的検討を行う場合は、多くのケースで行うことはできないものの、10ケース未満であってもある程度判断ができるものと考えられる。しかし、定量的分析を行うために、航行位置に関連する量の頻度分布を得ようとするならば、少なくとも50～100ケース程度は必要となろう。若干の条件を変更すると、さらに10～100倍位になり、その分析を含む実験解析は相当時間がかかると推察される。したがって、水域施設計画の代替案についての定量的な検討を前提とするこの種の手法に関する研究開発には、水域計画シミュレータモデルとしてリアルタイムモデルに限定することなく、時間を実時間よりも短縮した大型コンピュータによるファーストタイムシミュレーションならびにファーストタイムシミュレータモデルとの連携が有効と考えられる。

2) 解析例

ここでは、操船に関する船舶の基本的特性について解

析した例を示す。

操船における基本特性として、旋回時の旋回半径および減速、変針時の舵角と変針角度の関係および新進路距離、減速時の進出距離他があげられる。

以下に、これらの一例をシミュレータによって作成する。実験船舶の諸元は、表-7.2である。

(1) 旋回半径

15ノットの初速で航行している実験船が、急激に右側に35度の舵をきったときの航跡は図-7.15である。図中の数字は経過時間を分で表した数である。

このとき、変針動作によってエネルギーを消費するために、速力が図-7.16の曲線のように低下する。

(2) 変針操船

舵輪を操作して船舶は針路を変えるが、一般に変針操船は操船者によって、また、状況によっても異なる。

ここでは、図-7.17の上図にみられるような最も単純な舵輪操作により変針する場合を採用する。すなわち、変針する場合はつねに舵角 $\delta = +15$ 度に舵を設定し、その後、 t_1 で-15度の舵をきり、最後に t_2 で舵を0度にして変針後の直進に戻る操作法である。

具体的に α 度だけ変針する場合を、図-7.17の上図で説明する。まず、時刻0のとき、舵角0度で直進している状態から+15度に舵角を設定する。その結果、航跡は図-7.17の下図のように右へ変針する。その後、変

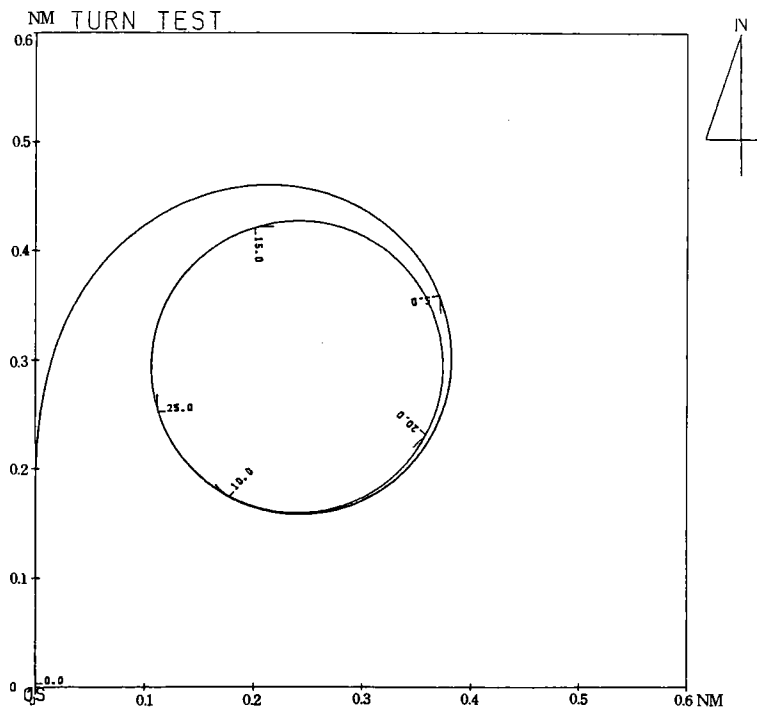


図-7.15 15 KT - 35 deg 旋回航跡

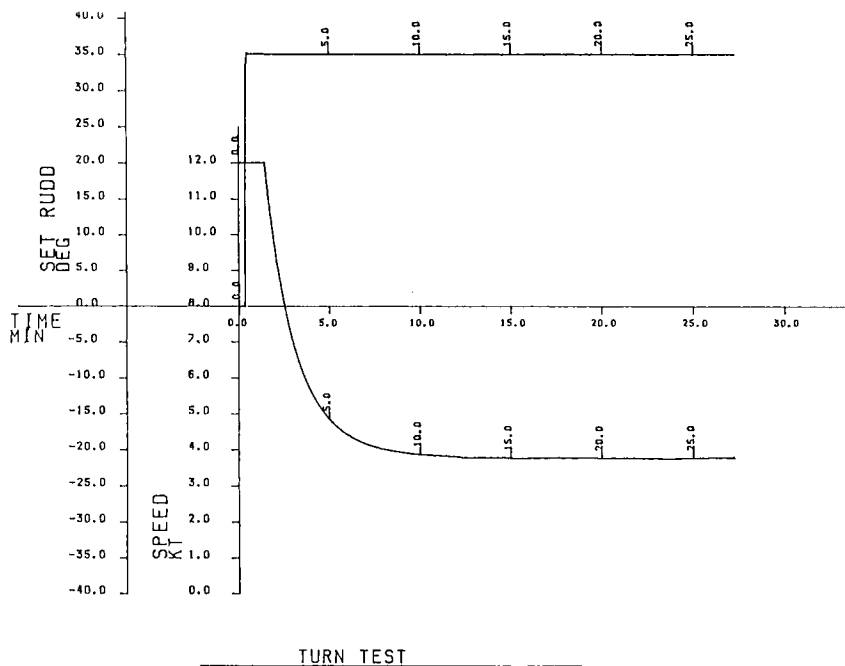


図-7.16 15 KT - 35 deg 旋回時の速力

針角が b 度に達したときに、 -15 度の舵をきり、そのままの状態でも角速度が 0 になるまで進み、角速度が 0 になった瞬間に、舵を 0 度にして変針操船を終了する。図-7.17 の上図で、実線は設定した舵角を示し、破線は設定時より応答が少し遅れた実舵角を示す。

この変針操船は、舵をきっている継続時間には関係なく、希望変針角 a 度と途中の変針角（切返し角度） b 度のみで定まる。したがって、 a と b の関係をあらかじめ求めておけば、変針操船は、この a と b を用いて上で述べた操船を行えばよい。実際には、この a と b は、設定舵角 δ および船速にも依存することから、設定舵角と船速をいろいろ変えて、 a と b の関係をシミュレータにより求める。設定舵角 $\delta = 15$ 度、速力 12 ノットで航行しているときの a と b の関係を、縦軸に a 、横軸に b として図-7.18 に示す。

図-7.18 によって、例えば 40 度の変針を行う場合の操船の手順は、縦軸上に $a = 40$ 度を示す位置を求め、横軸に平行でこの点を通る直線と曲線との交点が示す横軸

の値 b を読み取る。この値 b が切返し角度を示す。この場合、切返し角度は図より 23 度である。したがって、直進から右舵 15 度を取り、船首方向が切返し角度である 23 度だけ回頭したときに左舵 15 度を取り、その後、回頭角速度が、ちょうど、0 になったときに舵角を 0 度にとり、そのまま進めば 40 度の変針が完了する。

このときの、新進路距離は図-7.19 で与えられ、初速 12 ノットで 40 度の変針をする場合、舵角を 15 度設定して上で述べた操船をすると、きりかえし角が 23 度であるから、図より約 940 m であることがわかる。

舵角や船速の値をいろいろと変えて、この図表を準備しておけば、その船舶に限っては変針の特性がわかり、ミクロ的な水域計画に必須の計画情報が得られ、従来の方法よりも精度の良い計画が策定されよう。

実際の計画にあたっては、さらに、計画対象水域を通過する最も操船性のわるい船舶でこれらを検討すればよい。

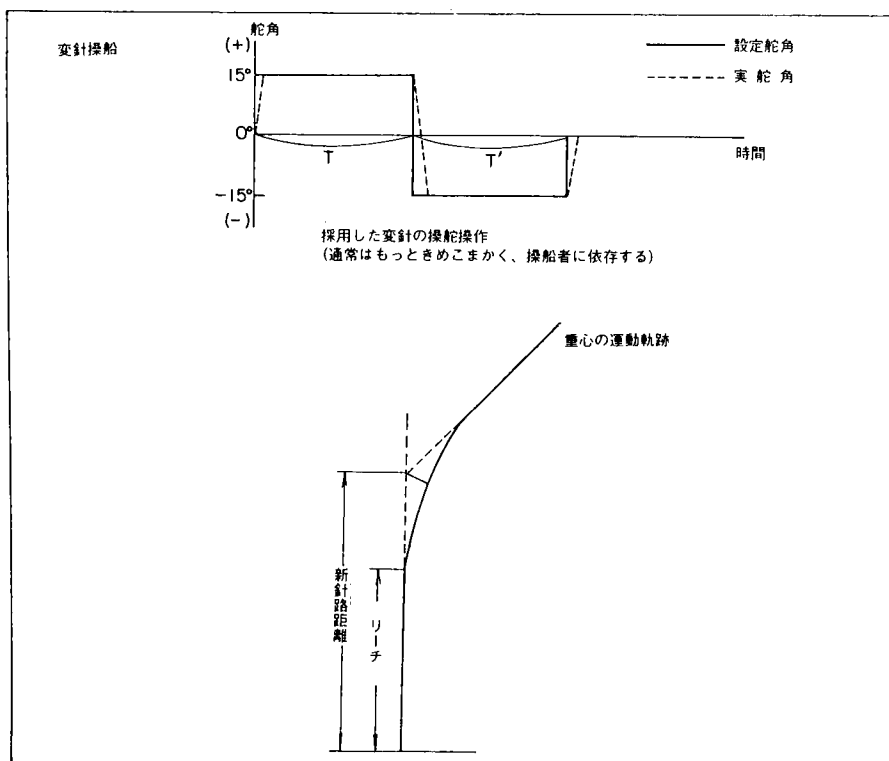


図-7.17 変針操船(最も単純な変針操作と変針航跡に関する解析のためのパラメータ)

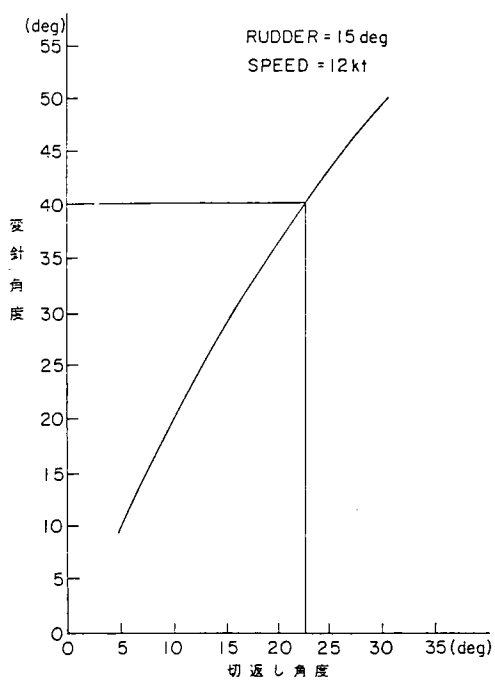


図-7.18 変針における切返し角度

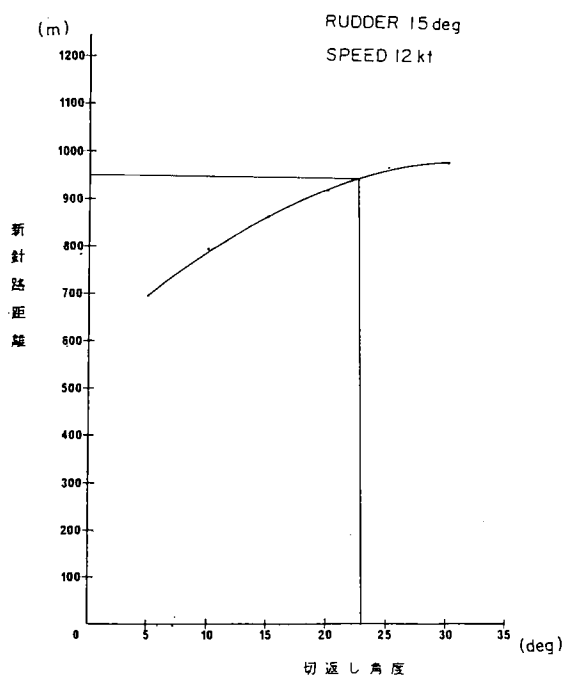


図-7.19 新針路距離図

実際の変針操船はこれほど単純ではなく、もっときめ細かい操作で舵をきるから、この方法による検討は、安全側に立っていることになる。

(3) 減速特性

船舶は自動車と異なり、ブレーキはすぐには効かず、減速をしようとしてもなかなか止らない。機関回転数70 rpmで12ノットから50 rpmにおとして8ノットになるまでの時間と速力および進出距離を図-7.20に、25 rpmにおとして4ノットになるまでの図を図-7.21に示す。

図において、最左端の縦軸は減速を始めた時点からの速力の目盛りであり右下がりの曲線で示され、次の左縦軸は進出距離の目盛りであり右上がりの曲線で示されている。右縦軸は機関回転数の目盛りであり、設定回転数はながめの破線で、応答の遅れる実回転数はみじかめの破線で示されている。

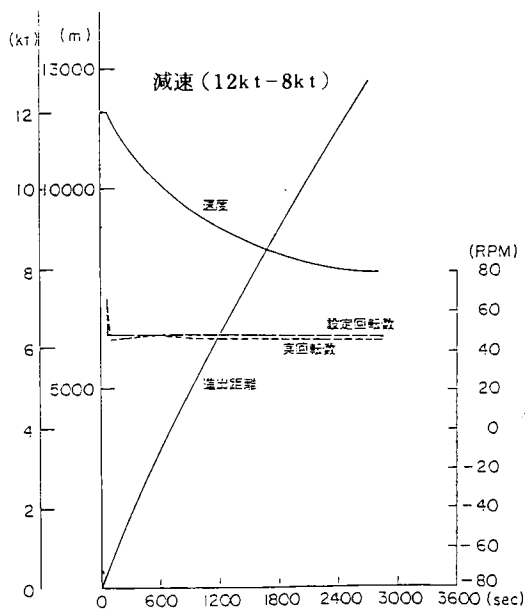


図-7.20 減速操船と進出距離

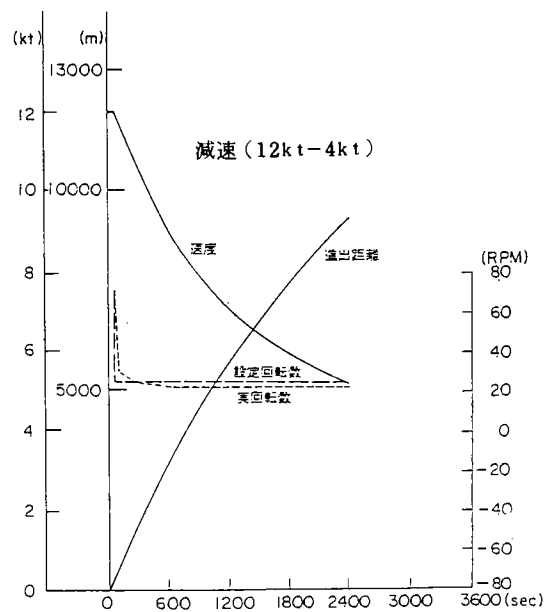


図-7.21 減速操船と進出距離

3) 展望

数多くの船舶で、舵角、速力、機関回転数等を変えて図-7.15～図-7.21をはじめとする各種の船舶性能テスト結果の図面等を作成しておけば、水域計画上のミクロな問題点は相当解決が可能であると思われる。

その結果、7.3.2のような水域計画シミュレータによる実船さながらの実験は、ある程度かたまった計画の妥当性を検討するに留まることとなるであろう。計画をそこまでかためる手法は、上述したように水域計画シミュレータによる数多くの船舶性能テストを基にした解析結果を駆使した手法に移行していくことが予想される。

実際、一つの水域計画が与えられたとき、非常に操船の上手な者がシミュレータで問題なく操船できても、よい水域計画であるという保証はない。各種の船舶性能図を基にして検討するほうが、よりよい水域計画が作成されよう。

本研究は、世界的にも今後に期待される分野に属し、水域計画における計画手法が近い将来においてすっかり変わってしまうのではないと思われる。

7.4 結言

水域計画シミュレータは、港湾計画、特に航路計画をはじめとする水域計画にとって、ミクロな計画情報を得るために必要不可欠の道具になるものと予想される。

本章においては、水域計画シミュレータの概要と適用方法の展望を述べたに過ぎないが、主要な結果は以下のとおりである。

- (1) 水域計画におけるミクロ的な計画情報を得るため操船シミュレータを基本とした水域計画シミュレータを開発した。
- (2) 水域計画シミュレータを利用して、実船では不可能な入出港操船を航海士が行うことにより事前に水域施設計画の検討が可能となった。
- (3) 水域計画シミュレータを利用して、数多くの操船テストが可能となったことから水域計画における技術基準の見直しが可能となった。

参 考 文 献

- 1) 杉崎昭生：シミュレータについて，航海 第47号，日本航海学会，1975年，pp.83～89.
- 2) 杉崎昭生：東京商船大学における船舶（船橋）シミュレータのシステム設計の方針と将来，航海 第49号，日本航海学会，1976年，pp.98～103.
- 3) 谷初蔵，小林弘明，遠藤 真：東京商船大学船舶操縦シミュレータの紹介，航海 第50号，日本航海学会，1976年，pp.10～16.
- 4) J.P.Hooft and P.J.Paymans：Four Years Operation Experience with the Ship Control Simulator，航海 第53号，日本航海学会，1977年，pp.65～68.
- 5) H.Grapentin, VFW-Fokker：Possibilities for Solving Visual Problems in Navigation and Ship Simulator，航海 第61号，日本航海学会，1979年，pp.68～72.
- 6) O.Millms：Experience of Training Using Shiphandling Simulator，航海 第62号，日本航海学会，1979年，pp.62～65.
- 7) Ingo Harre, Manfred Henkel：Measuring and Displaying the Component of Ship's Motions to Assist Decision-making when Manoeuvring，航海 第63号，日本航海学会，1979年，pp.72～81.
- 8) P.I.Collier：Simulation as an Aid to the Study of a port as a System，航海 第64号，日本航海学会，1980年，pp.63～64.
- 9) 和気博嗣：英国におけるレーダシミュレータ訓練，航海 第72号，日本航海学会，1982年，pp.37～42.
- 10) 松浦由次：I H I 操船シミュレータとその利用例，航海 第74号，日本航海学会，1982年，pp.77～82.
- 11) 原昌三，原泰徳：C G I (Computer Generated Imagery) 方式の操船シミュレータについて，航海 第74号，日本航海学会，1982年，pp.83～88.
- 12) 原 深，野本謙作，小須田敏：操船シミュレータによる避航操船の研究—I，日本航海学会論文集 第64号，1981年，pp.79～86.

8. 結論

本研究は海上交通計画に要請される海上交通工学上の問題点の解明に関し、海上交通の現実の姿の把握、海上交通で主役を演ずる船舶の寸法に関する調査解析、水路における交通容量に関する理論的アプローチ、理論で扱うには余りにも複雑な海上交通における諸問題を解明するための交通シミュレーションの開発、さらにそれらを補完するミクロ的なアプローチである水域計画シミュレータの開発を対象として、これらの研究成果および成果の活用によって得られる海上交通計画に必要な計画情報の実際例をとりまとめたものである。各章で得られた成果を結論的に述べると以下のとおりである。

2.においては、従来から実施されていた海上交通実態の観測法および観測結果の解析手法を、初めて電子計算機で実施した点に意義がある。この観測解析システムが開発されてから、一部の漁船調査や交通量をカウントするだけの目視による船舶交通調査を除くと、多くの海上交通実態調査はこの形式をとっている。

また、従来から実施されていた海上保安庁の海上交通実態観測の解析に電子計算機を導入した際に、観測データの保存形式を2.3.1で述べたフォーマットと同一にしていた。その結果、保存媒体である磁気テープの互換性により、解析プログラムで相互のデータが解析可能となった。従来の観測結果が、数多くの貴重な情報を有しているにもかかわらず捨てられ、かつ海上交通実態調査が予算と労働力を莫大に消費することを考えあわせると、画期的な進歩である。

その後、神戸商船大学においてもフォーマットは異なるが電算化がなされ、さらに民間コンサルタントにおいても全く同一の考え方で同様のシステムが開発されて、現在では海上交通実態の把握には欠かせないものとして、数多くの港湾計画、航路計画の第一段階の計画情報取得の際に重要な役割をになうに至っている。

また、これらの成果は、計画担当者の計画情報として種々の形に加工されるばかりでなく、海上交通工学研究者の理論考証の際にも広く利用されており、陸上の交通工学と比較すると著しく遅れている海上交通工学の発展に貢献している。とりわけ、海上交通シミュレーションを実施する際に必要とする莫大な量の入力データは、この実態観測の解析結果に負うところが大きい。このように、2.で開発したシステムは、直接的にも間接的にも大量の計画情報を提供する。

なお、実態観測結果の映画化は、従来の観測結果が静的な図面や数値のみで表示されており、動的な情報がほ

とんど消え去ってしまうことから、静的な図表を補完するものとして、海上交通の実態をより正確に把握することに有効であることが確かめられた。

3.においては、海上交通計画にあたって必要とされる船舶の主要寸法を解析した。重量トン数、総トン数、純トン数、全長、吃水、および型幅に関する値は、ロイドレジスターに記載されている約6万隻の船舶および日本船舶明細書の約1万隻の船舶をもとに解析した。マスト高に関しては、造船会社等へのアンケートをもとに調査解析し、検討を行った。

調査解析の成果は、港湾工事の技術基準に生かされるばかりでなく、その性格上、海上交通計画にも活用されている。この種の調査研究は地味で評価も低いが、社会の変化および技術の進歩により船舶諸元が著しく変遷することを考えると、毎年は無理としても数年ごとに実施することが望ましい。運輸省港湾局では、船舶の寸法の重要性から、第7次港湾整備5ヶ年計画に向けて、最近の船舶に関して3.と同様の船舶諸元調査を実施することを予定している。

4.においては、海上交通における主要な指標である交通容量の問題を理論的に取扱った。港湾の出入口は片道通航水路である場合も数多く見うけられ、そのために進入待ちのみを考慮した小交通量モデルを提案した。さらに、運河や狭水道に見られる水路通過時間の長い長大水路のケースとして、大交通量モデルを提案した。大交通量モデルでは、容量の決定とあわせて待ちについても考察した。

この場合、1.でも述べたように、船舶は大きさが極端に異なることから、容量の取扱いには、単に隻数だけで論ずるわけにはいかず、非常に難しい。そこで、片道通航水路の特徴を生かして、水路の交通容量を測定する単位として交通容量等価時間を提案した。交通容量等価時間の導入によって、難しい容量の概念が無矛盾にしてしかも明確となり、本章における容量の取扱いを著しく容易にした。これは、スエズ運河の1日の交通容量が70隻であるという場合と、交通容量等価時間が7時間という場合を想定するとき、隻で表示する場合には大型船か小型船かといった船型の構成比を必要とするが、時間で表示する場合には船間時間が10分の船ならば42隻、5分の船ならば84隻と船型の構成比に関係なく、スエズ運河を通行する船舶の所要船間時間によって容量が定まる利点を指す。

所要船間時間が、船舶の全長 L や全長の二乗 L^2 に比例する場合には、交通容量等価時間で求めた容量は L 換算隻数や L^2 換算隻数の交通容量と最終的に一致する。

しかし、比例しない場合には交通容量等価時間以外には適切な容量の単位は見つからないと思われ、この種の容量問題を扱うときには交通容量等価時間が優れていることを指摘した。

また、待ちに関する計画情報は、隠れマルコフ連鎖の理論を展開して求められることを指摘した。さらに異常事態によって待ちが大量に生じたときに平常に戻るまでの待ちに関する情報、すなわち、遷移状態確率も得られることを指摘した。

5.においては、海上交通流のマクロ的な評価手法として、ネットワーク・シミュレーションを提案した。これは観測結果の解析と理論解析だけでは得られない海上交通計画情報を得ることを目的として開発されたシミュレーションである。このネットワーク・シミュレーション以前のシミュレーションは、船舶の挙動を忠実に追求するものが多く、海上交通計画には有効ではあるものの、精密であり過ぎるために、大量の入力情報を正しく収集することが困難であること、および計算機の容量と時間を莫大に使用して費用もかさむことから、小海域でしかシミュレートできずに利用頻度は稀であった。しかも、船舶の動きと双壁をなす操船判断部のアルゴリズムが操船者によって異なるといったシミュレーション以前に解決しておかなければならない難解な問題を抱えこんでいることもあって、必然的に、他のシミュレーションの開発の要請が高まってきた。その要請に応じて、ネットワーク・シミュレーションを開発した。

ネットワーク・シミュレーションは、海上交通理論の検証を目的とする場合にも利用されるが、圧倒的に多いのは計画者が計画情報を入手する目的で利用される場合である。航路体系の検討、水域施設計画、管制計画の検討に有効であるばかりでなく、ふ頭計画をも含めた港湾計画を始めとして海上工事における工事関連船の妥当な隻数の検討や工事順序の検討にも非常に有効である。項目によっては相対評価による評価で絶対評価が難しいこと、および所要船間隔についても距離間隔よりも船速に基づいた時間間隔で与える方が望ましいことといった意見もあり、今後検討すべき余地を残してはいるものの、従来のシミュレーションと比較すると、概念も理解しやすくしかもより有用で大量な計画情報の提供を可能としている。

具体的成果としては、従来の海上交通シミュレーションでは対応できなかった広大な海域における海上交通上の問題を解決しようという当初の予想を大幅に上回り、東京湾、大阪湾、伊勢湾、三河湾、瀬戸内海、備讃瀬戸航路の航路体系の検討、およびむつ小川原港、苦小牧港

(西部地区)、苦小牧港(東部地区)、高知港、大阪港、川崎港、日立那珂港、横浜港、秋田湾港等の港湾計画の検討、さらに羽田沖合展開、神戸臨海地区湾岸道路、関西国際空港、東京湾横断道路等の建設計画の検討、その他、南関東大震災対策調査にも利用され、計画者に必要な種々の情報を提供している。

事例としてあげた苦小牧港(西部地区)の計画では、夜間入出港の禁止、入出港船の管制フルバスによる待ち、定時に到着するフェリーをも考慮に入れた港内幅輻に関する計画情報のみならず、付随して数多くの計画情報をもたすことが示されている。上記の備讃瀬戸の航路体系の検討においては、それ自体では幅輻の程度の相対比較の結果しか得られなかったが、宇高航路における待ち船の割合が全体の1/3であるという結果は、同海域の観測によって得られた避航船の全通航船舶に対する比とほぼ一致しており、ネットワーク・シミュレーションの絶対的評価の可能性も示唆している。

この場合も実態調査結果と同じく、シミュレーションの過程の映画を作成したが、シミュレーションの正しさと、手法を視覚で理解させる試みは、その後、潮流計算や汚染拡散などの数多くのシミュレーションにおける結果の映画化の先鞭をつけたものである。

6.は、2.から5.までの研究成果の実例への応用例である。事例として、関西国際空港建設計画を取り上げた。内容は、環境アセスメントの一環として海上交通影響の程度を計るための一般船舶の予測にはじまるネットワーク・シミュレーションの実行、その結果得られた明石海峡における幅輻度についての理論的な細かい検討、大阪湾内の船舶の動静を把握しようとする実態調査結果をもとにした船舶管理システムの提案とその可能性の検討、さらに、ネットワーク・シミュレーションの異なった型への適用として土運船の運航に関する研究である。これらは、どれをとっても、大規模な埋立計画において検討を要する必須の事項である。

とりわけ、土運船の数と種類、埋立土量と土砂積出地とのバランス、夜間における土運船の停泊位置と停泊隻数といった土運船運航計画にとって重要な計画情報ばかりでなく、埋立工事の工事手順や平面計画に関する計画情報を計画担当者に提供することも可能であることを指摘した。

7.では、海上交通計画に必要なマクロな情報を作成することに主眼を置いてきた2.から6.までの章に対して、そこでは不足していたミクロな船舶の挙動についての情報を取得しようという目的で開発した水域計画シミュレータを取扱った。これは、船舶探縦シミュレータを利用

して、航路計画や港湾施設計画を検討しようというものであり、そのために水域計画シミュレータを開発し、その海上交通計画への適用方法を論じた。この試みは、最近、外国で盛んになり、日本においても端緒についたばかりである。数多くの事例では、航海者が実際にシミュレータを操作して港湾計画などに応用している。ここでは、そのような例としてタイ港のマブタブット港の計画を事例にあげ、水域計画シミュレータの有効性を示した。

しかし、水域計画シミュレータの開発の目的は、そのような利用よりも、むしろ、7.3.3に示したように実船では不可能な数多くの船舶性能テストを数多く実験し、海上交通計画に必要な計画情報をまえて作成することにある。ここでは、その方針を述べ、今後の研究開発を展望した。

以上述べたように、本研究による成果は、従来、経験と勘でなされてきた海上交通計画において、先人の意志を基本的にひきつぎつつ、最近の理論、資料、および飛躍的發展を遂げた電子計算機を中心に据えた情報処理技術を駆使して、数多くの計画情報を計画者にあらかじめ与えたことである。これらの成果は既に数多くの現実の事例において十分にその役割を果たしてきた。

謝 辞

この論文は、多くの方々の御指導と御援助のもとにできあがったものである。

論文をとりまとめるにあたり、京都大学工学部の長尾義三教授には多くの有益な示唆と懇切な御指導を受け、絶えず暖かい御激励をいただいた。筆者がまがりなりにも本論文をまとめることができたのは、ひとえに先生のおかげであり、ここに記して心から感謝いたします。

本研究は、港湾技術研究所設計基準部システム研究室における港湾のシステム設計に関する研究における水路系のシステム設計に関する研究課題を主体に、一部、ふ頭システムの設計に関する研究課題の成果を補足することにより足かけ13年にわたる研究成果を取りまとめたものである。

まず、水路系のシステム設計に関する研究計画の一環として、苫小牧港の観測を皮切りに、海上交通実態観測、および解析システムの開発に着手した。早藤能伸技官、金子彰技官、笹嶋博技官、佐々木芳寛技官、夏海松子技官、佐々木典倫子技官の協力を得て実施した。その後、東京湾の航路体系調査研究、むつ小川原港の試験的な港湾計画で簡易航路シミュレーションを開発し、さらに苫小牧港（西部地区）の港湾計画において、早藤技官、佐々木（芳）技官に加えて中辻隆技官の協力を得て、全

面的なシミュレーションの変更を行った。その後、寺内潔技官と口田登技官の協力を得て、数多くのシミュレーションを実行した。その間、6万隻に及ぶ船舶を有するロイドレジスターの資料整理、1万隻に及ぶ日本船について日本船舶明細書の整理を終え、船舶諸元の解析を寺内技官と吉田行秀技官の協力で実施した。その前後から片道通航水路の交通容量解析に着手し、待ちに関する考察の計算プログラムは、早藤技官の協力を、図面作成には吉田技官の協力を得た。工事関連船の影響調査では実態観測データの磁気テープのコード変換、整理事業は早藤技官の協力による。水域計画シミュレータの導入には石渡設計基準部長の協力を得、そのシステム設計には佐藤恒夫技官の協力を得た。シミュレータの実行などは、早藤技官、北川俊治技官の協力を得た。本文の整理、図面の整理、プログラミング、ランニングなどにあたっては佐藤珠実技官、および山下英子さんをはじめとする多くの非常勤職員の方々の協力を得た。また、数多くの海上交通実態の観測では、早藤技官、金子技官、笹嶋技官、佐々木（芳）技官、夏海技官、佐々木（典）技官、中辻技官、吉田技官、寺内技官、口田技官、齊藤純技官、佐藤（恒）技官、佐藤（珠）技官、北川技官および他研究室の研究員の方々の協力を得た。

また、本研究の着想は工藤和男前システム研究室長に負うところが非常に大きい。

この間、工藤室長をはじめとして、金子技官、笹嶋技官、佐々木（芳）技官、夏海技官、佐々木（典）技官、中辻技官、寺内技官、口田技官、齊藤技官、佐藤（恒）技官、佐藤（珠）技官が、システム研究室を去っている。

ここに記して、以上の方々にお礼を申し上げるしだいである。

付録 A 解析注文表の記入要領

ここでは、2.3.2 5) で述べた図-2.17 の解析注文表の記入方法を示す。

解析注文表は、注文表1枚に対して、出力図表1枚である。解析注文表の記入は、すべて、注文項目の該当する欄(□内)に○印をつけるだけである。また、解析注文表は座標読取装置でこのまま読みとられる。そのため、この解析注文表を不必要に折り曲げたり、破いたりしないよう注意する。

各欄の記入方法は以下のとおりである。

観測値 別に定められた観測地コードに従って該当番号に○印をつける。

図の種類 解析した図に○印をつける。密度図については、単純換算、 L 換算、 L^2 換算の3種類に分けてある。

図面番号 航跡図、密度図、ゲート通過隻数図、ゲートライン通過速力分布ごとに一連番号をつける。(上段が10の位、下段が1の位)

時間条件 解析したい時間帯の開始時刻、終了時刻を指定する。なお、観測データのすべての時間について解析する場合は、この欄は記入しないこと。

- 1) 「日」の欄は観測を開始した日を第1日として、順に第2日、第3日とする。
- 2) 時刻の指定は、午前、午後と時間、分の欄の該当する数字に○印をつける。(10分単位以下の時刻の指定はできない。)
- 3) 観測期間を通じて、毎日同一時間帯を解析する場合は、「日」の欄は記入しなければならない。

なお、ここで時間が指定されたとき、全データのうち指定時間内の船舶の移動のみを抽出して解析する。このため、航跡図に於て、短い時間帯で指定した場合、個々の船の航跡が短くなることに留意する必要がある。

船種 解析したい船種について○印をつける。2個以上指定してもよい。

トン階 解析したいトン階について○印をつける。2個以上指定してもよい。

すべての船種、トン階について解析したい場合はなにも記入しなければよい。

(船種欄が無記入のときは全船種となり、およびトン階欄が無記入のときは全トン階となる。)

ゾーン条件 あらゆる船の流動のうち、指定したゾーン相互間の流れ(OおよびD)に着目して解析

したい場合この欄で指定をする。なお、ゾーンによる条件指定を必要としない場合は記入しないこと。

指定の方法は次による。

〔上の表〕 解析設定図に記入されたゾーン番号(1, 2, ……)を、1個または2個以上組合せて、出発ゾーンまたは到着ゾーンとするゾーン群(A, B, C…)を上表で構成する。

〔下の表〕 上の表で構成されたゾーン群(A, B, C…) (A, B, C…)をもとにして下の表(出発ゾーン群, 到着ゾーン群の組合せ表)によりODの指定を行う。

下の表のその他とは

(a) ゾーン群Aから出る船舶について解析する場合
出発ゾーン群=A 到着ゾーン群=その他

(b) ゾーン群Aにはいる船舶について解析する場合
出発ゾーン群=その他 到着ゾーン群=A

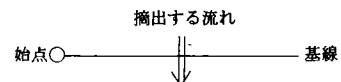
のように使用すればよい。(〈記入例1〉③参照)

基線条件 解析設定図に記入されたある基線を通過した船についてだけ解析したい場合、この欄で基線および基線の条件を指定する。(なお、基線条件をこの欄で○印をつけた基線は、次の〔方向判定条件の基線組合せ〕欄で必ず指定しなければならない。) もし、基線による指定を行わない場合は記入しなければよい。ここで指定すれば、ある特定の基線を通過した船について、指定した条件に該当する船だけ解析対象として採用され、必要なときは解析結果を基線(ゲートライン)に表示させることもできる。

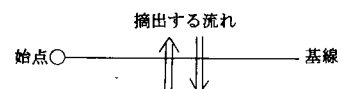
1) 通過方向

基線や通過した船のうち、どの方向に横切った船を解析対象として採用するかを、次の3つの中から選ぶ。

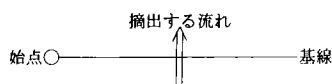
「左→右」…基線の始点(設定図に記入)からみて左から右へ横切った船舶



「両」……基線を両方向から横切った船(すなわち横切った船全部)



「右→左」…基線の始点（解析設定図に記入）からみて右から左へ横切った船



2) 基線番号

解析対象とする基線を解析設定図に記入した基線の中から選び、その番号に○印を付ける。上段の数字が10の位、下段の数字が1の位を示す。

3) 除外進入角（図-2.14参照）

基線を通過した船のうち、指定角度以下で横切った船を解析対象から除外したい場合に使用する。除外する角度は基線に対する角度をもって指定する。（0度と指定すれば除外される船はなくなる。）角度は0～85度の5度単位に指定できる。左側の8ワックが10の位を、右側の2ワックが1の位を示している。（0度または5度を指定する場合は10の位は記入しなくてよい。）

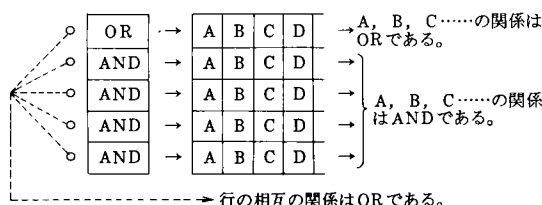
4) 解析用基線

基線を通過した隻数を測定するための基準とすると○印をつける。すなわち通過隻数図、速力分布図で解析結果を出力させる基線としたい場合には、この欄に○印をつければ、ゲートごとの通過隻数、または速力ランクごとの通過隻数をカウントして出力する。

方向判定条件の基線組合せ

上記の基線条件で条件をつけられた基線（A, B, C, …）について基線相互の組合せを指定して、抽出する流れを決める。基線条件欄で記入した基線は、本欄でも必ず記入する。

この表の組み合わせの意味はつぎのとおりである。



- 1個の基線の場合はORの行のA, B, Cに○印をつける。
- 左端のORとANDの欄は○印はつけなくてよい。

使用メッシュNo.

密度図による解析を行う場合、その際に使

用する使用メッシュNo.（解析設定図に記入した番号）に○印をつける。

出力図面のワック

図面を出力する場合、図面の表示範囲を解析設定図に記入した番号にしたがって○印をつける。図面を出力する場合は必ず記入する。

重ね書き継続

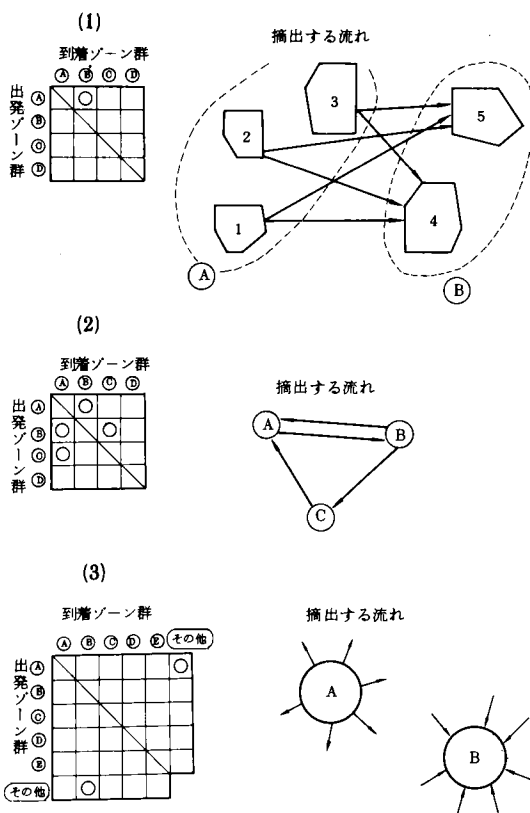
この注文表だけでなく、次の注文表の指定内容も合せて解析したい場合に、YESに○印をつけ、時間条件、ゾーン条件、基線条件、方向判定基線の組合せについて次の注文表で追加指定をする。この場合本注文表と次の注文表の関係はORとなる。

以下に、記入例を示す。

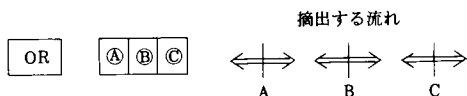
＜記入例1＞ ゾーン条件

解析設定図のゾーン1, 2, 3をゾーン群A、ゾーン4, 5をゾーン群Bとする場合、ゾーン条件の〔上の表〕ゾーン群-ゾーン番号表のAの行の1, 2, 3に○をつける。Bの行の4, 5に○をつける。

このとき、ゾーン条件の〔下の表〕出発ゾーン群-到着ゾーン群表で、次の(1), (2), (3)のようなODを指定した場合、抽出される流れを右側に図示する。

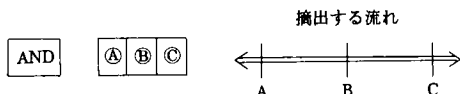


〈記入例２〉 方向判定条件のORの例



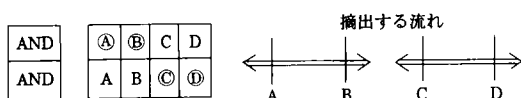
AまたはBまたはCの基線条件を満足する船について解析する。

〈記入例３〉 方向判定条件のANDの例



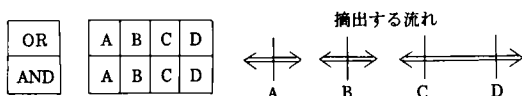
AとBとCの基線条件を共に満足する船について解析する。

〈記入例４〉 方向判定条件のAND，ANDの例



AとBの基線条件を共に満足する船，またはCとDの基線条件を共に満足する船について解析する。

〈記入例５〉 方向判定条件のOR，ANDの例



Aの基線条件またはBの基線条件を満足する船，あるいはCとDの基線条件を共に満足する船について解析する。

解析注文表は，解析の数だけ必要とすることから，さらに，解析の全体を統括する設定要目表も作成する。

設定要目表は，以下に示す表であり，解析設定図とともに，観測および典型的な解析に関する条件を与えるものである。

設 定 要 目 表							
観 測 期 間	①	観 測 地	観測地コード	フロッピー			
	②	観測期間(データ採取時間)			延べ時間		
	③	月 日 時 分 ~ 月 日 時 分			分		
	④						
ト ン ボ ウ	⑤	絶対座標の原点					
	⑥	LAT. _____ N LONG. _____ E					
	⑦	トンボウ	X	Y	絶対座標点から 緯度線をX軸 経度線をY軸 とした場合		
	⑧	A	メートル	メートル			
設 定 内 容	⑨	B	メートル	メートル			
	⑩	トンボウAとトンボウBの距離					
	⑪	メートル					
	⑫	⑩, ⑪を記入した場合は記入しなくてよい。					
解 析 図 面	⑬	記入項目	設定図(1)	設定図(2)	設定図(3)	設定図(4)	設定図(5)
	⑭	ゾーン					
	⑮	基 線					
	⑯	メッシュ					
図 面 重 複	⑰	出力図面の グラフ					
	⑱	○ 各設定図には必ずトンボウA, Bを記入のこと。 ○ 地形, 航路, 方位, 距離スケールは設定図 には必ず記入のこと。					
	⑲	記入項目	航 路 図	密 度 図	通過図	運力分布図	
	⑳	枚 数					
図 面 重 複	㉑	図面番号					
	㉒						

付録 B 重量トン数，総トン数，純トン数， 船の全長，型幅，満載吃水の関係式

1) 回帰式

回帰式においてDWは重量トン数，GTは総トン数，NTは純トン数， L は船の全長， B は型幅， d は満載吃水をあらわす。またトン階領域を不等号表示にしていなのは算出された値が，境界上で任意に安全なように値をとる必要があるためであって境界領域を明確に定めると不都合な場合も生じることによる。

6種類の船舶のグループで，フェリー貨物を除く貨物を輸送するグループでは，重量トンと船の全長，満載吃水，型幅，総トン，純トンとすべて重量トンの回りの回帰を求め，旅客船とフェリーボートでは，総トンの回りの回帰を求めた。

表中， t^* は $t(n-2, 0.001)$ の値である。

(1) 一般貨物

表-B.1～表-B.5である。

(2) 石油タンカー

表-B.6～表-B.10である。

(3) 鉱石専用船

表-B.11～表-B.15である。

(4) 木材専用船

表-B.16～表-B.20である。

(5) 旅客船

表-B.21～表-B.25である。

(6) カーフェリー

表-B.26～表-B.30である。

2) 計算結果の図示

回帰曲線と分布形を，図-B.1～図-B.30に示す。破線は回帰の推定値を示し，実線は回帰に回帰のまわりの標準偏差の0.675倍したものを加えたもので，データが回帰のまわりに正規分布すると仮定した場合には，この実線は全データ数の75%をカバーする。

(貨物船)

表-B.1 DWとLの関係

データ数		1,786	6,501
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-60,000
75%回帰式	a	0.674	0.970
	b	0.362	0.297
50%回帰式	a	0.654	0.947
	b	0.362	0.297
回帰の回りの標準偏差	σ	0.029	0.034
パラメータの標準偏差	σ_a	0.008	0.007
	σ_b	0.003	0.002
相関係数	r	0.954	0.919
相関の検定	t_r	134.256	188.173
	t^*	3.291	3.291

表-B.4 DWとGTの関係

データ数		1,786	6,036
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-60,000
75%回帰式	a	—	—
	b	—	—
50%回帰式	a	-0.366	-0.061
	b	1.015	0.966
回帰の回りの標準偏差	σ	0.120	0.066
パラメータの標準偏差	σ_a	0.034	0.013
	σ_b	0.011	0.003
相関係数	r	0.906	0.969
相関の検定	t_r	90.183	306.406
	t^*	3.291	3.291

表-B.2 DWとdの関係

データ数		1,786	6,568
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-60,000
75%回帰式	a	-0.297	-0.154
	b	0.301	0.268
50%回帰式	a	-0.305	-0.173
	b	0.301	0.268
回帰の回りの標準偏差	σ	0.038	0.028
パラメータの標準偏差	σ_a	0.011	0.005
	σ_b	0.004	0.001
相関係数	r	0.895	0.929
相関の検定	t_r	84.598	203.080
	t^*	3.291	3.291

表-B.5 DWとNTの関係

データ数		1,786	5,994
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-60,000
75%回帰式	a	—	—
	b	—	—
50%回帰式	a	-0.715	-0.619
	b	1.049	1.049
回帰の回りの標準偏差	σ	0.121	0.067
パラメータの標準偏差	σ_a	0.034	0.013
	σ_b	0.011	0.003
相関係数	r	0.910	0.973
相関の検定	t_r	92.983	326.949
	t^*	3.291	3.291

表-B.3 DWとBの関係

データ数		1,786	6,633
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-60,000
75%回帰式	a	0.068	0.204
	b	0.303	0.271
50%回帰式	a	0.048	0.183
	b	0.303	0.271
回帰の回りの標準偏差	σ	0.029	0.031
パラメータの標準偏差	σ_a	0.008	0.006
	σ_b	0.003	0.001
相関係数	r	0.935	0.920
相関の検定	t_r	111.371	190.475
	t^*	3.291	3.291

(石油タンカー)

表-B.6 DWとLの関係

データ数		1,257	3,183
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-150,000
75%回帰式	a	0.663	0.935
	b	0.364	0.302
50%回帰式	a	0.643	0.925
	b	0.364	0.302
回帰の回りの標準偏差	σ	0.030	0.014
パラメータの標準偏差	σ_a	0.010	0.004
	σ_b	0.003	0.001
相関係数	r	0.955	0.990
相関の検定	t_r	113.394	388.135
	t^*	3.291	3.291

表-B.9 DWとGTの関係

データ数		1,257	3,197
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-150,000
75%回帰式	a	—	—
	b	—	—
50%回帰式	a	0.103	0.141
	b	0.935	0.919
回帰の回りの標準偏差	σ	0.089	0.041
パラメータの標準偏差	σ_a	0.030	0.010
	σ_b	0.010	0.002
相関係数	r	0.940	0.991
相関の検定	t_r	97.168	429.544
	t^*	3.291	3.291

表-B.7 DWとdの関係

データ数		1,786	3,188
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-150,000
75%回帰式	a	-0.317	-0.159
	b	0.312	0.267
50%回帰式	a	-0.337	-0.174
	b	0.312	0.267
回帰の回りの標準偏差	σ	0.029	0.022
パラメータの標準偏差	σ_a	0.010	0.006
	σ_b	0.003	0.001
相関係数	r	0.941	0.968
相関の検定	t_r	98.706	216.300
	t^*	3.291	3.291

表-B.10 DWとNTの関係

データ数		1,254	3,161
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-150,000
75%回帰式	a	—	—
	b	—	—
50%回帰式	a	0.001	-0.446
	b	0.982	1.002
回帰の回りの標準偏差	σ	0.086	0.050
パラメータの標準偏差	σ_a	0.029	0.012
	σ_b	0.009	0.003
相関係数	r	0.947	0.989
相関の検定	t_r	104.794	376.659
	t^*	3.291	3.291

表-B.8 DWとBの関係

データ数		1,257	3,188
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-150,000
75%回帰式	a	0.129	-0.025
	b	0.281	0.326
50%回帰式	a	0.109	-0.055
	b	0.281	0.326
回帰の回りの標準偏差	σ	0.029	0.044
パラメータの標準偏差	σ_a	0.010	0.011
	σ_b	0.003	0.003
相関係数	r	0.930	0.920
相関の検定	t_r	89.933	132.030
	t^*	3.291	3.291

(鉱石専用船)

表-B.11 DWとLの関係

データ数		26	291
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-100,000
75%回帰式	a	0.777	0.993
	b	0.331	0.288
50%回帰式	a	0.768	0.981
	b	0.331	0.288
回帰の回りの標準偏差	σ	0.013	0.018
パラメータの標準偏差	σ_a	0.032	0.016
	σ_b	0.009	0.004
相関係数	r	0.990	0.978
相関の検定	t_r	35.108	80.468
	t^*	3.707	3.291

表-B.14 DWとGTの関係

データ数		26	276
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-100,000
75%回帰式	a	—	—
	b	—	—
50%回帰式	a	-0.245	0.289
	b	1.003	0.885
回帰の回りの標準偏差	σ	0.034	0.066
パラメータの標準偏差	σ_a	0.086	0.058
	σ_b	0.025	0.013
相関係数	r	0.993	0.970
相関の検定	t_r	39.940	65.621
	t^*	3.754	3.291

表-B.12 DWとdの関係

データ数		26	291
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-100,000
75%回帰式	a	-0.202	-0.063
	b	0.280	0.243
50%回帰式	a	-0.218	-0.075
	b	0.280	0.243
回帰の回りの標準偏差	σ	0.023	0.018
パラメータの標準偏差	σ_a	0.059	0.016
	σ_b	0.017	0.004
相関係数	r	0.958	0.970
相関の検定	t_r	16.345	67.596
	t^*	3.745	3.291

表-B.15 DWとNTの関係

データ数		26	289
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-100,000
75%回帰式	a	—	—
	b	—	—
50%回帰式	a	-0.454	0.452
	b	0.975	0.764
回帰の回りの標準偏差	σ	0.112	0.110
パラメータの標準偏差	σ_a	0.284	0.095
	σ_b	0.083	0.022
相関係数	r	0.923	0.900
相関の検定	t_r	11.774	34.947
	t^*	3.745	3.291

表-B.13 DWとBの関係

データ数		26	291
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-100,000
75%回帰式	a	0.072	-0.117
	b	0.296	0.347
50%回帰式	a	0.065	-0.144
	b	0.296	0.347
回帰の回りの標準偏差	σ	0.010	0.040
パラメータの標準偏差	σ_a	0.026	0.034
	σ_b	0.008	0.008
相関係数	r	0.992	0.933
相関の検定	t_r	39.235	44.225
	t^*	3.745	3.291

(木材専用船)

表-B.16 DWとLの関係

データ数		14	79
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-30,000
75%回帰式	a	0.674	0.714
	b	0.359	0.348
50%回帰式	a	0.659	0.704
	b	0.359	0.348
回帰の回りの標準偏差	σ	0.023	0.014
パラメータの標準偏差	σ_a	0.041	0.028
	σ_b	0.013	0.007
相関係数	r	0.992	0.984
相関の検定	t_r	27.927	48.765
	t^*	4.318	3.435

表-B.19 DWとGTの関係

データ数		12	79
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-30,000
75%回帰式	a	—	—
	b	—	—
50%回帰式	a	-1.128	-0.638
	b	1.248	1.103
回帰の回りの標準偏差	σ	0.066	0.044
パラメータの標準偏差	σ_a	0.149	0.090
	σ_b	0.046	0.023
相関係数	r	0.993	0.984
相関の検定	t_r	27.353	48.326
	t^*	4.587	3.435

表-B.17 DWとdの関係

データ数		14	79
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-30,000
75%回帰式	a	-0.296	-0.257
	b	0.302	0.288
50%回帰式	a	-0.324	-0.263
	b	0.302	0.288
回帰の回りの標準偏差	σ	0.041	0.010
パラメータの標準偏差	σ_a	0.074	0.020
	σ_b	0.023	0.005
相関係数	r	0.966	0.898
相関の検定	t_r	12.962	58.678
	t^*	4.318	3.435

表-B.20 DWとNTの関係

データ数		12	79
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-30,000
75%回帰式	a	—	—
	b	—	—
50%回帰式	a	-1.580	-0.710
	b	1.310	1.072
回帰の回りの標準偏差	σ	0.079	0.043
パラメータの標準偏差	σ_a	0.178	0.089
	σ_b	0.055	0.022
相関係数	r	0.991	0.983
相関の検定	t_r	23.926	47.669
	t^*	4.587	3.435

表-B.18 DWとBの関係

データ数		14	79
トン階領域	D.W.	500-5,000	5,000-30,000
75%回帰式	a	0.173	0.068
	b	0.277	0.303
50%回帰式	a	0.154	0.062
	b	0.277	0.303
回帰の回りの標準偏差	σ	0.029	0.009
パラメータの標準偏差	σ_a	0.052	0.018
	σ_b	0.016	0.005
相関係数	r	0.980	0.992
相関の検定	t_r	17.015	67.295
	t^*	4.318	3.435

(旅 客 船)

表-B.21 GTとLの関係

デ ー タ 数		111	56
トン階領域	G. T.	300-5,000	5,000-70,000
75%回帰式	a	0.569	1.005
	b	0.422	0.300
50%回帰式	a	0.532	0.985
	b	0.422	0.300
回帰の回りの標準偏差	σ	0.054	0.029
パラメータの標準偏差	σ_a	0.041	0.071
	σ_b	0.014	0.017
相 関 係 数	r	0.944	0.866
相関の検定	t_r	29.924	12.714
	t^*	3.386	3.479

表-B.24 GTとDWの関係

デ ー タ 数		82	37
トン階領域	G. T.	300-5,000	5,000-70,000
75%回帰式	a	—	—
	b	—	—
50%回帰式	a	-0.229	0.137
	b	0.929	0.847
回帰の回りの標準偏差	σ	0.270	0.169
パラメータの標準偏差	σ_a	0.230	0.416
	σ_b	0.078	0.099
相 関 係 数	r	0.799	0.822
相関の検定	t_r	11.895	8.527
	t^*	3.431	3.599

表-B.22 GTとdの関係

デ ー タ 数		111	56
トン階領域	G. T.	300-5,000	5,000-70,000
75%回帰式	a	-0.403	0.180
	b	0.320	0.183
50%回帰式	a	-0.449	0.138
	b	0.320	0.183
回帰の回りの標準偏差	σ	0.068	0.062
パラメータの標準偏差	σ_a	0.052	0.149
	σ_b	0.018	0.037
相 関 係 数	r	0.866	0.562
相関の検定	t_r	18.064	4.997
	t^*	3.386	3.478

表-B.25 GTとNTの関係

デ ー タ 数		104	58
トン階領域	G. T.	300-5,000	5,000-70,000
75%回帰式	a	—	—
	b	—	—
50%回帰式	a	-0.429	-0.207
	b	1.045	0.987
回帰の回りの標準偏差	σ	0.088	0.043
パラメータの標準偏差	σ_a	0.067	0.093
	σ_b	0.023	0.023
相 関 係 数	r	0.976	0.986
相関の検定	t_r	44.899	43.505
	t^*	3.399	3.478

表-B.23 GTとBの関係

デ ー タ 数		111	56
トン階領域	G. T.	300-5,000	5,000-70,000
75%回帰式	a	0.395	0.165
	b	0.227	0.287
50%回帰式	a	0.356	0.150
	b	0.227	0.287
回帰の回りの標準偏差	σ	0.058	0.022
パラメータの標準偏差	σ_a	0.043	0.054
	σ_b	0.015	0.013
相 関 係 数	r	0.825	0.961
相関の検定	t_r	15.254	25.571
	t^*	3.386	3.478

(カーフェリー)

表-B.26 GTとLの関係

デ ー タ 数		275
トン階領域	G. T.	300-12,000
75%回帰式	a	0.610
	b	0.409
50%回帰式	a	0.583
	b	0.409
回帰の回りの標準偏差	σ	0.041
パラメータの標準偏差	σ_a	0.017
	σ_b	0.005
相 関 係 数	r	0.977
相関の検定	t_r	75.866
	t^*	3.291

表-B.29 GTとDWの関係

デ ー タ 数		235
トン階領域	G. T.	300-12,000
75%回帰式	a	—
	b	—
50%回帰式	a	-0.462
	b	1.004
回帰の回りの標準偏差	σ	0.153
パラメータの標準偏差	σ_a	0.069
	σ_b	0.022
相 関 係 数	r	0.950
相関の検定	t_r	46.608
	t^*	3.291

表-B.27 GTとdの関係

デ ー タ 数		275
トン階領域	G. T.	300-12,000
75%回帰式	a	-0.335
	b	0.291
50%回帰式	a	-0.365
	b	0.291
回帰の回りの標準偏差	σ	0.045
パラメータの標準偏差	σ_a	0.019
	σ_b	0.006
相 関 係 数	r	0.947
相関の検定	t_r	48.563
	t^*	3.291

表-B.30 GTとNTの関係

デ ー タ 数		283
トン階領域	G. T.	300-12,000
75%回帰式	a	—
	b	—
50%回帰式	a	-0.502
	b	1.044
回帰の回りの標準偏差	σ	0.084
パラメータの標準偏差	σ_a	0.035
	σ_b	0.011
相 関 係 数	r	0.984
相関の検定	t_r	93.947
	t^*	3.291

表-B.28 GTとBの関係

デ ー タ 数		275
トン階領域	G. T.	300-12,000
75%回帰式	a	0.404
	b	0.252
50%回帰式	a	0.368
	b	0.252
回帰の回りの標準偏差	σ	0.053
パラメータの標準偏差	σ_a	0.022
	σ_b	0.007
相 関 係 数	r	0.908
相関の検定	t_r	35.899
	t^*	3.291

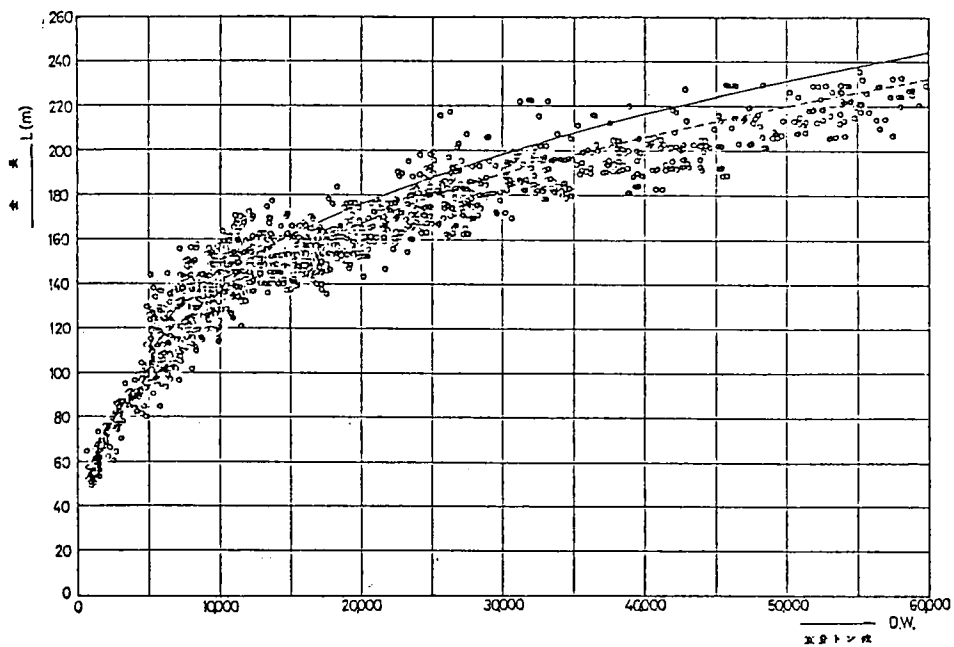


図-B.1 DW と L の関係 (貨物船)

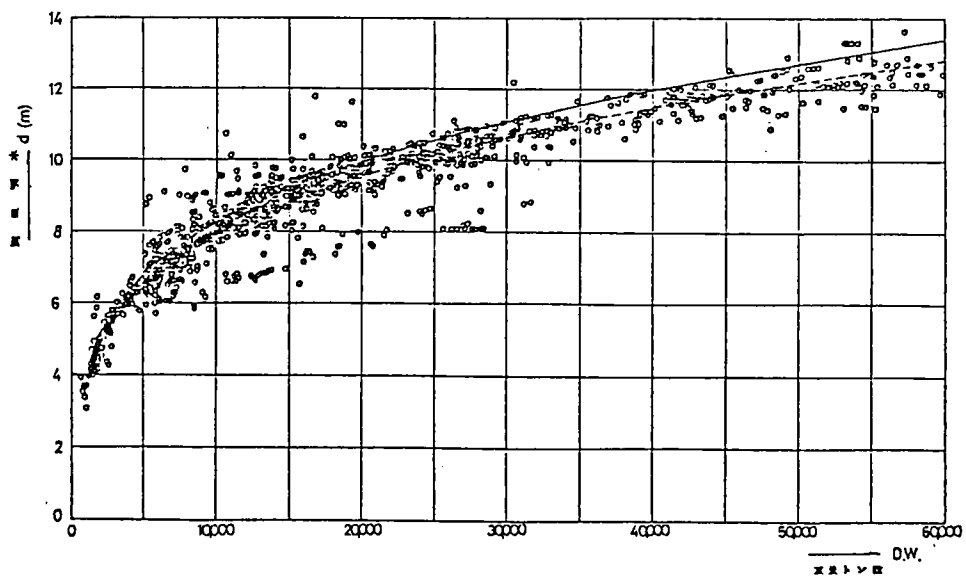


図-B.2 DW と d の関係 (貨物船)

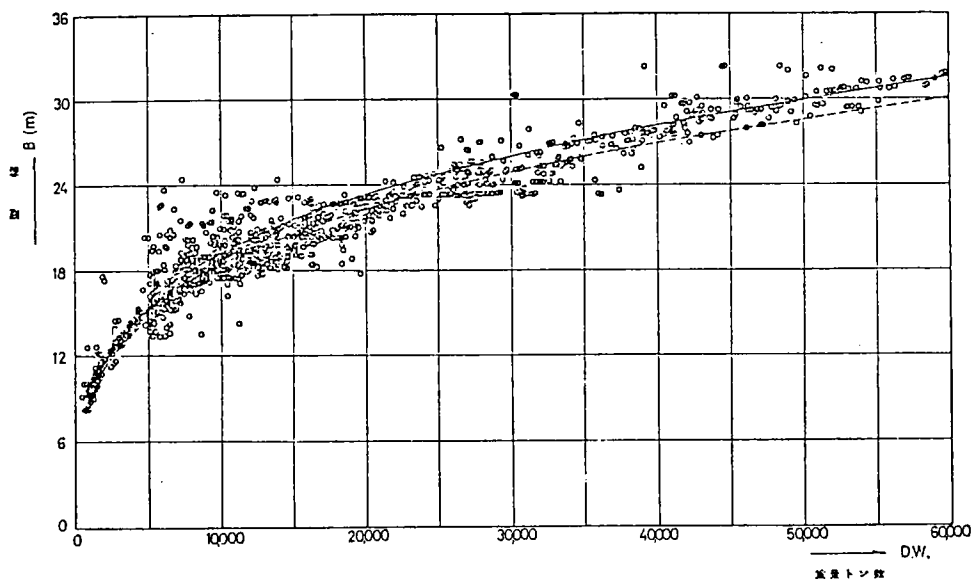


図-B.3 DWとBの関係(貨物船)

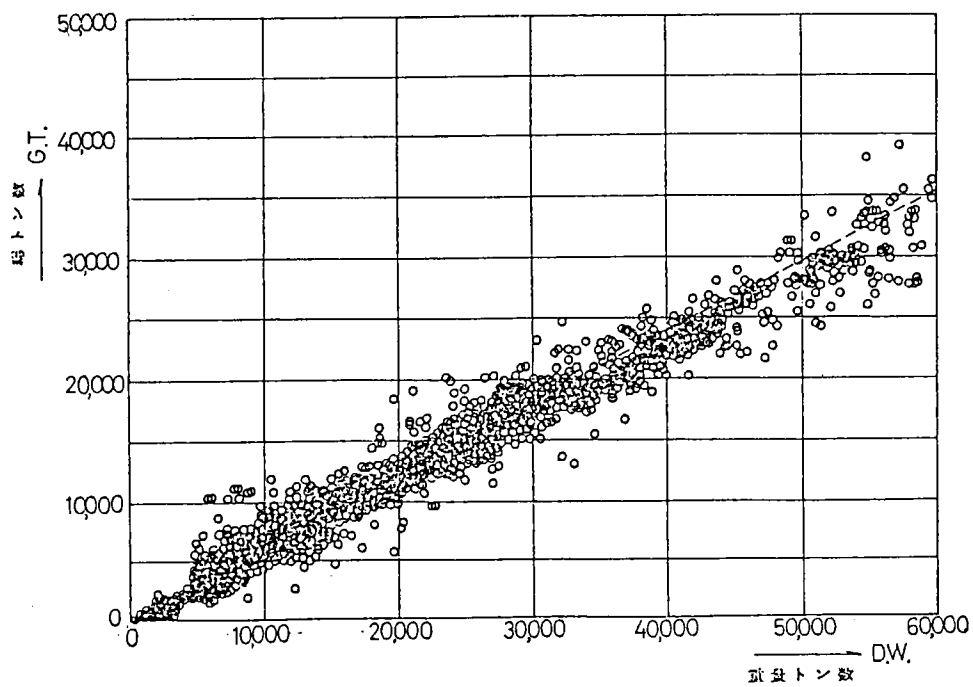


図-B.4 DWとGTの関係(貨物船)

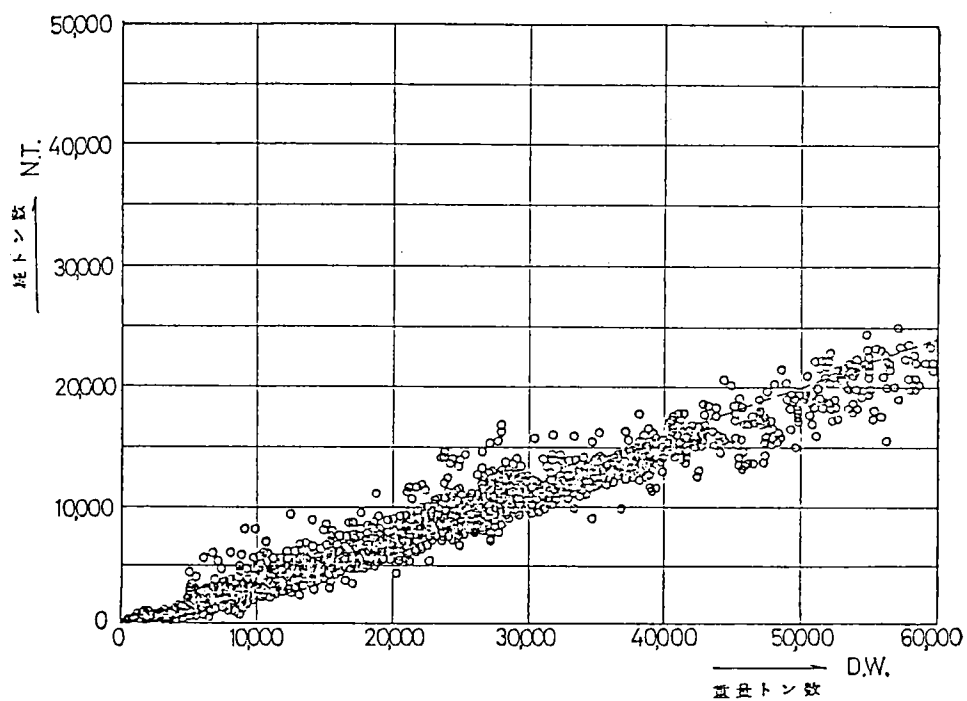


図-B.5 DWとNTの関係(貨物船)

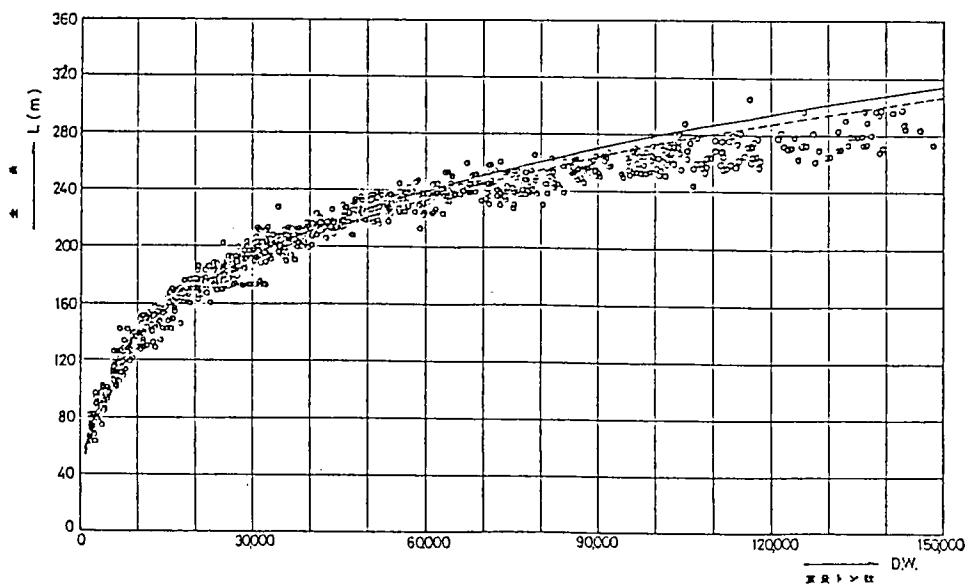


図-B.6 DWとLの関係(石油タンカー)

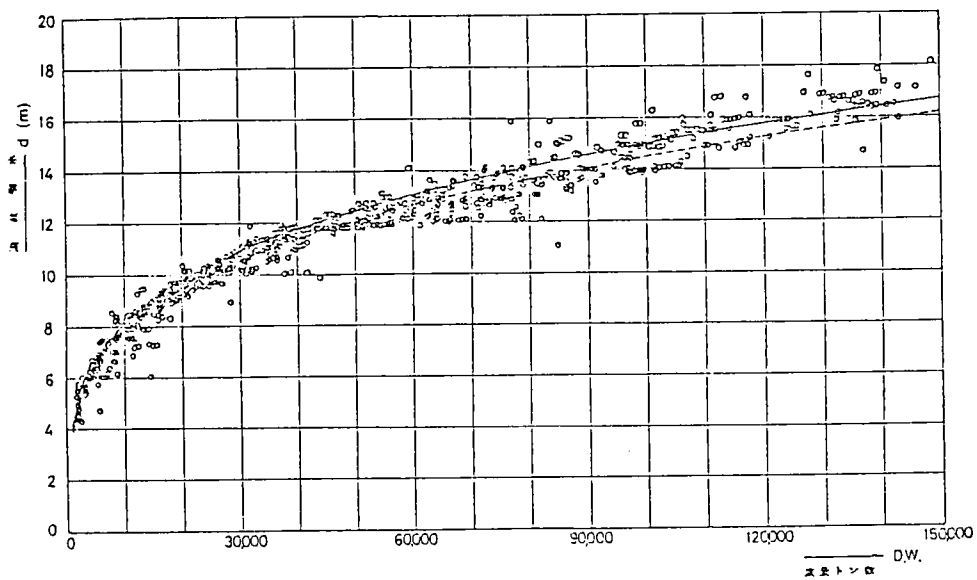


図-B.7 DW と d の関係 (石油タンカー)

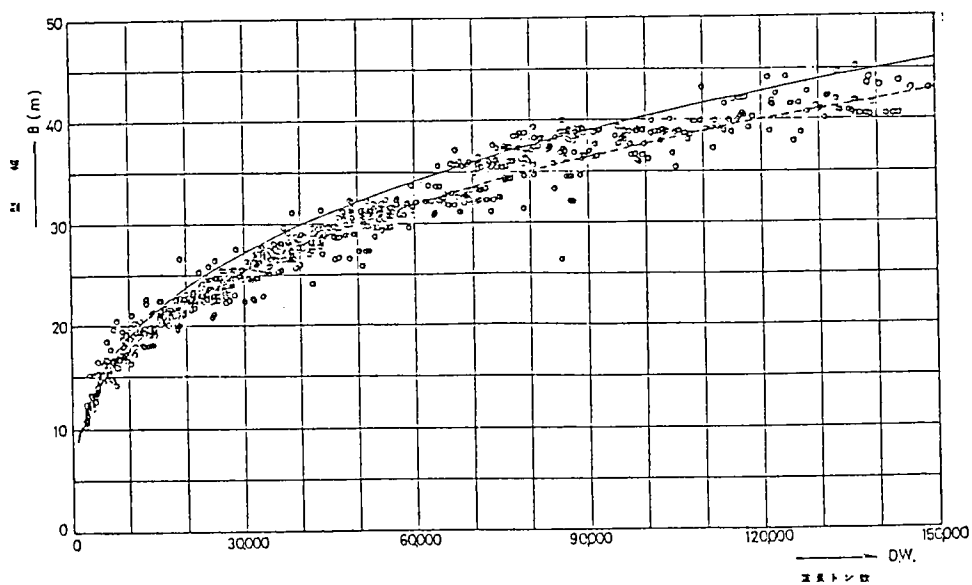


図-B.8 DW と B の関係 (石油タンカー)

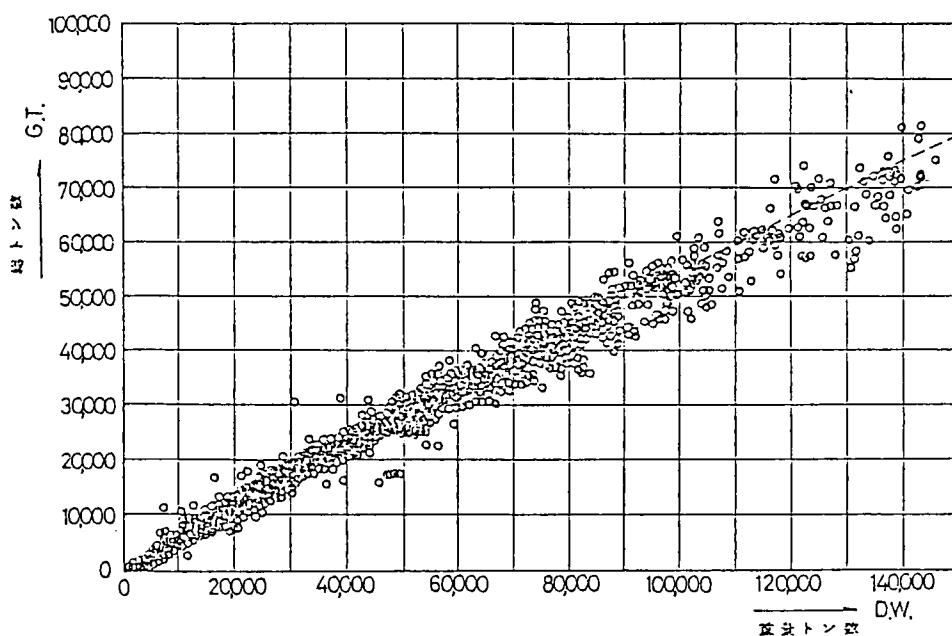


図-B.9 DW と GT の関係 (石油タンカー)

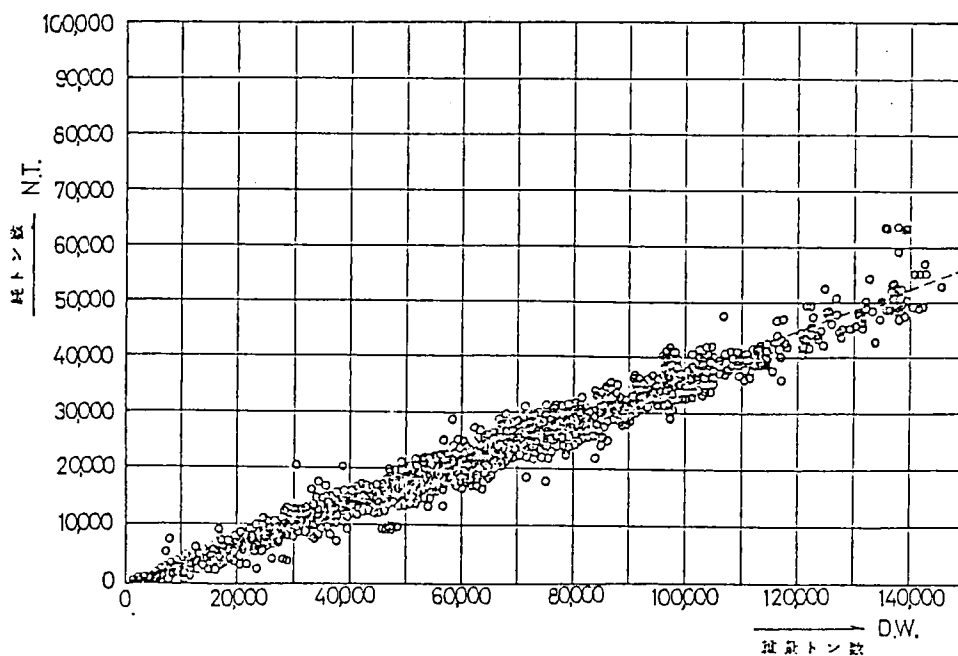


図-B.10 DW と NT の関係 (石油タンカー)

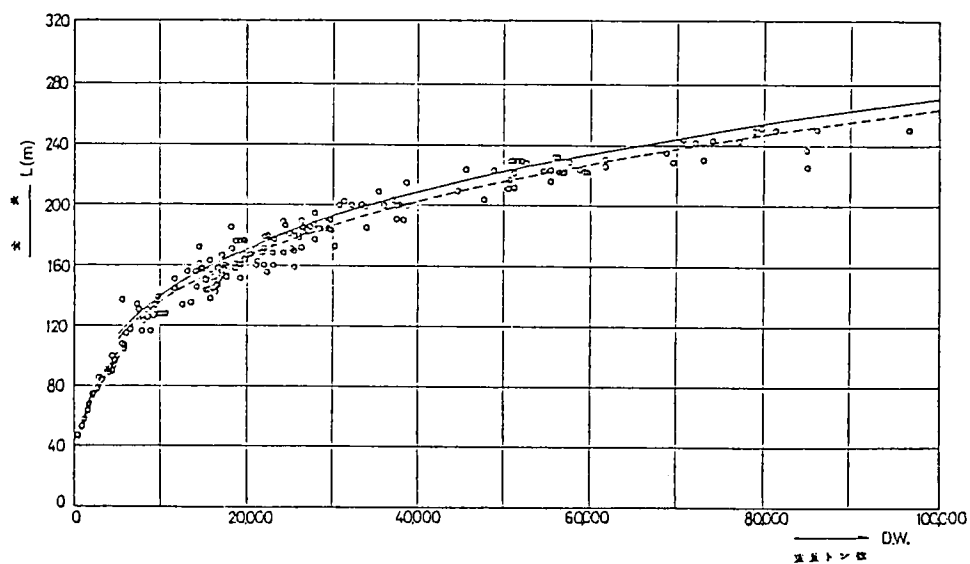


図-B.11 DWと L の関係(鉱石専用船)

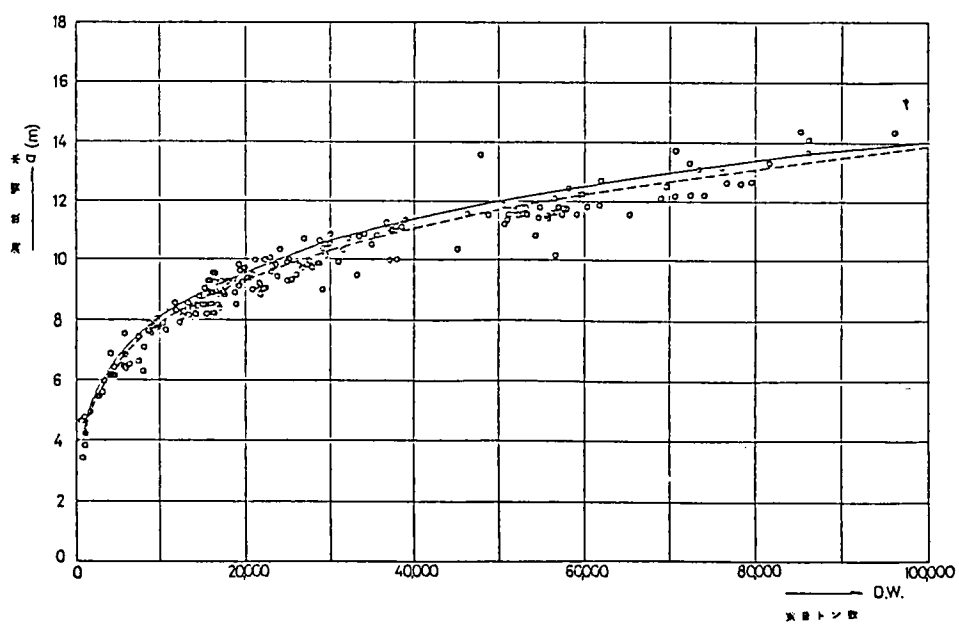


図-B.12 DWと d の関係(鉱石専用船)

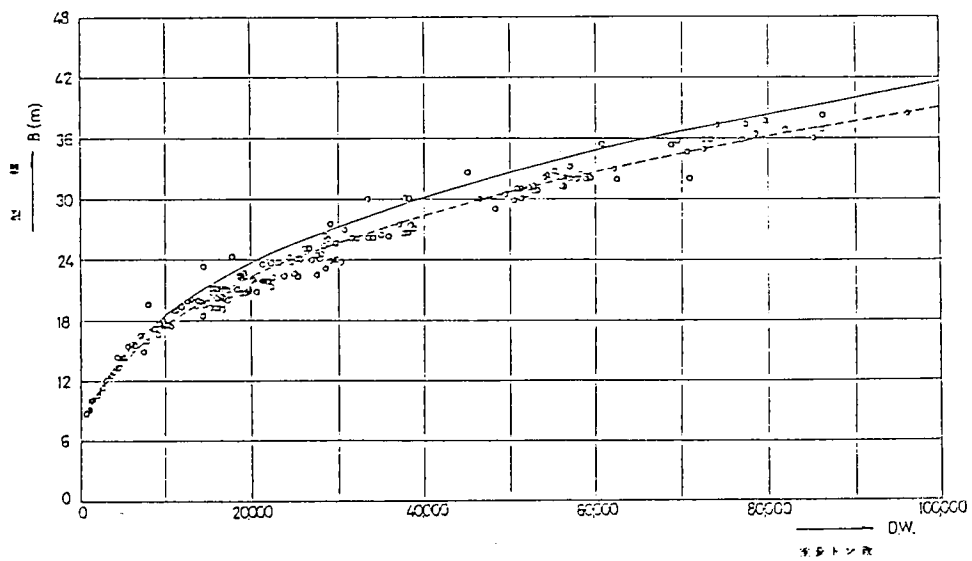


図-B.13 DW と B の関係 (鉱石専用船)

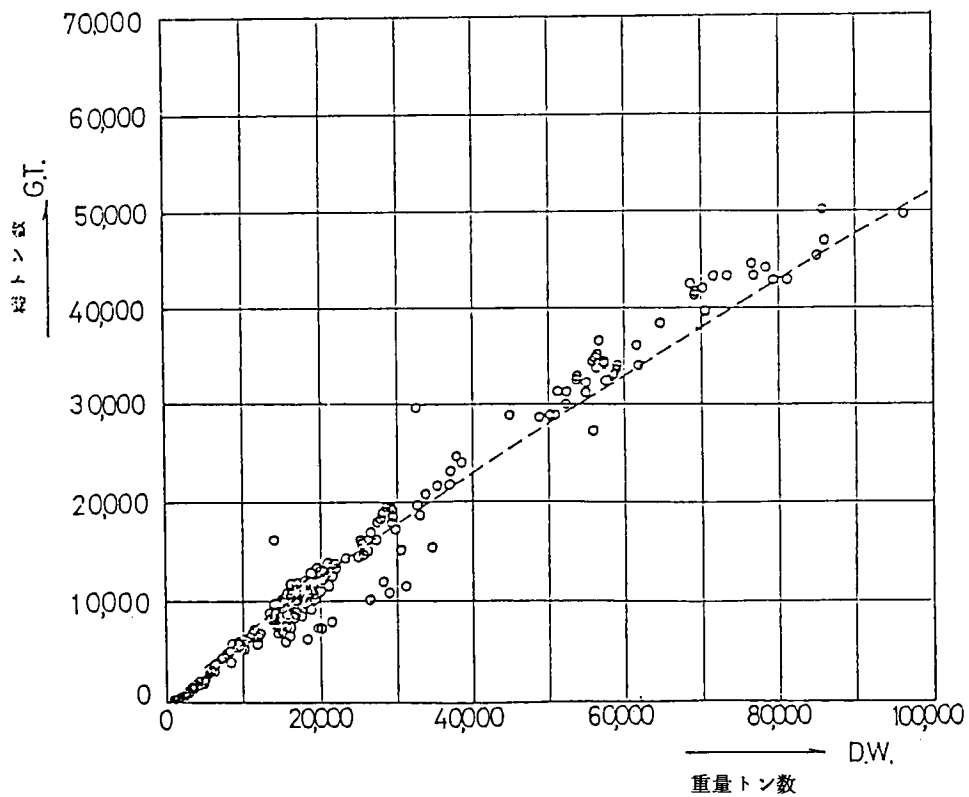


図-B.14 DW と GT の関係 (鉱石専用船)

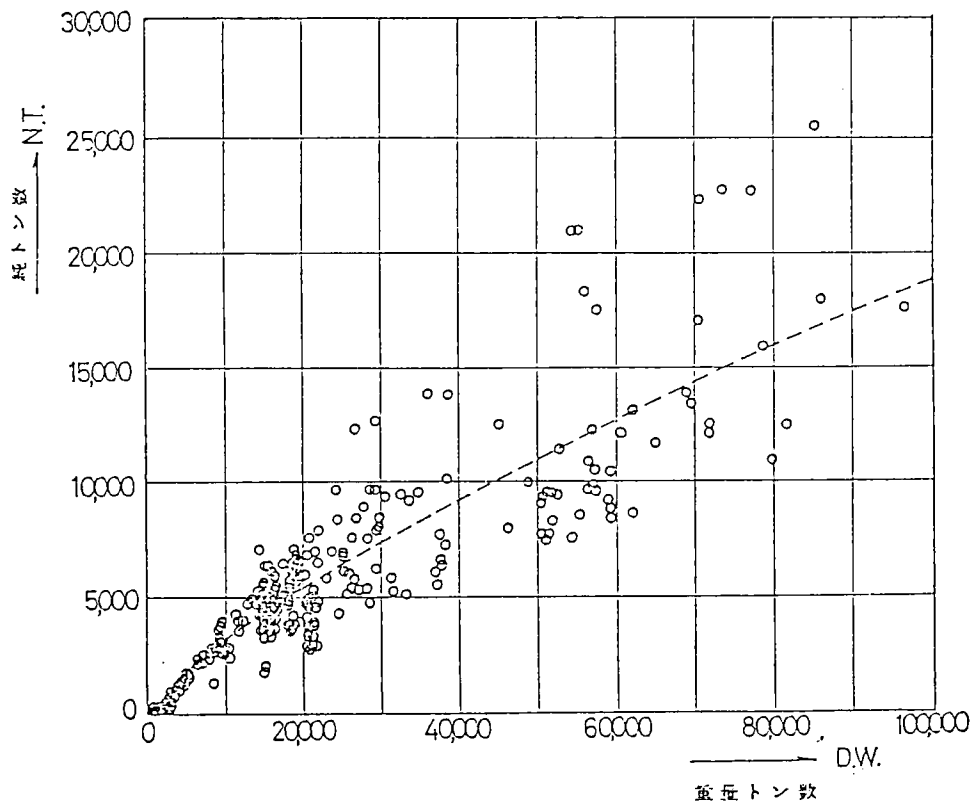


図-B.15 DWとNTの関係（鉱石専用船）

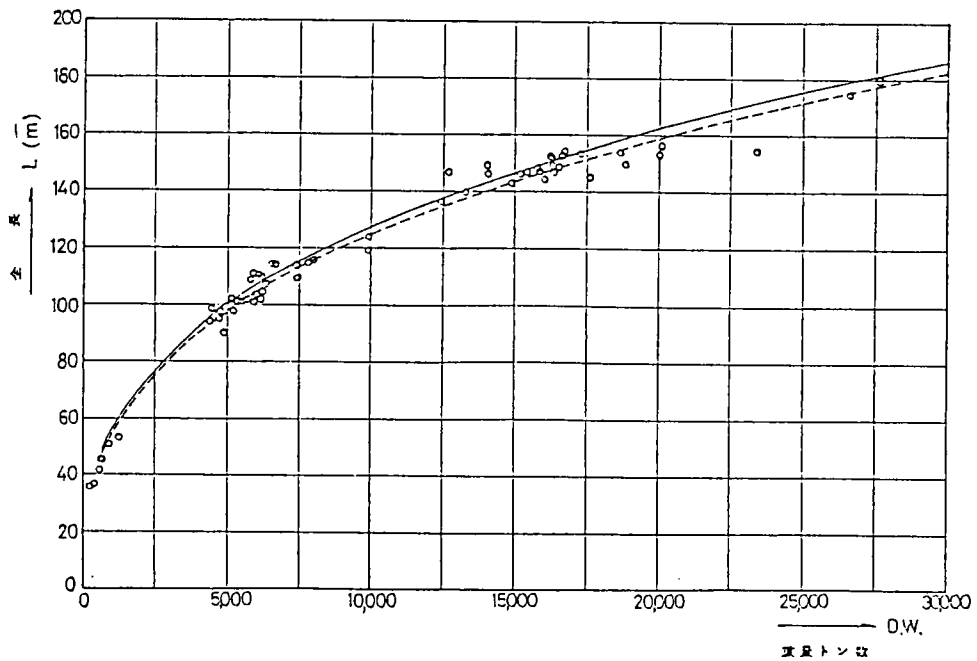


図-B.16 DWとLの関係（木材専用船）

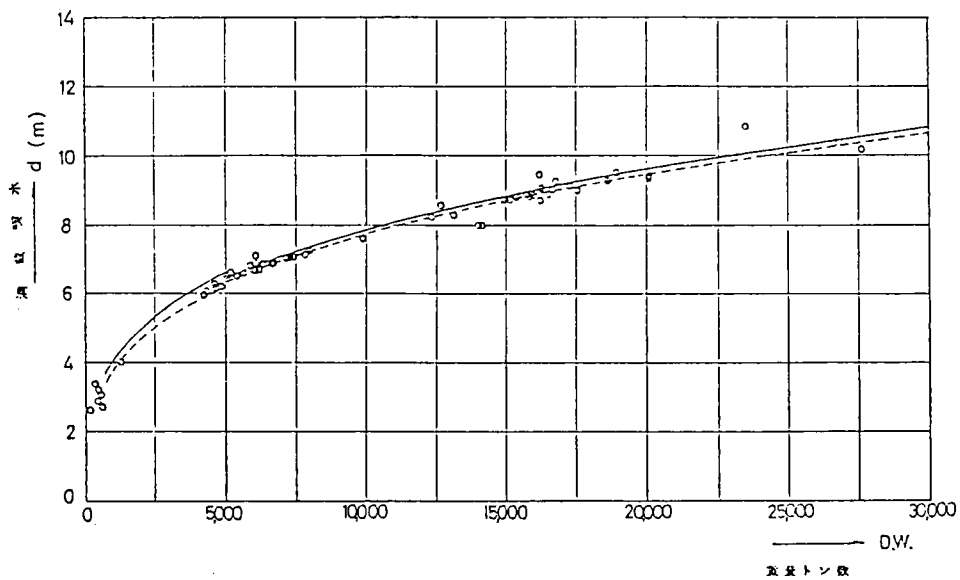


図-B.17 DW と d の関係 (木材専用船)

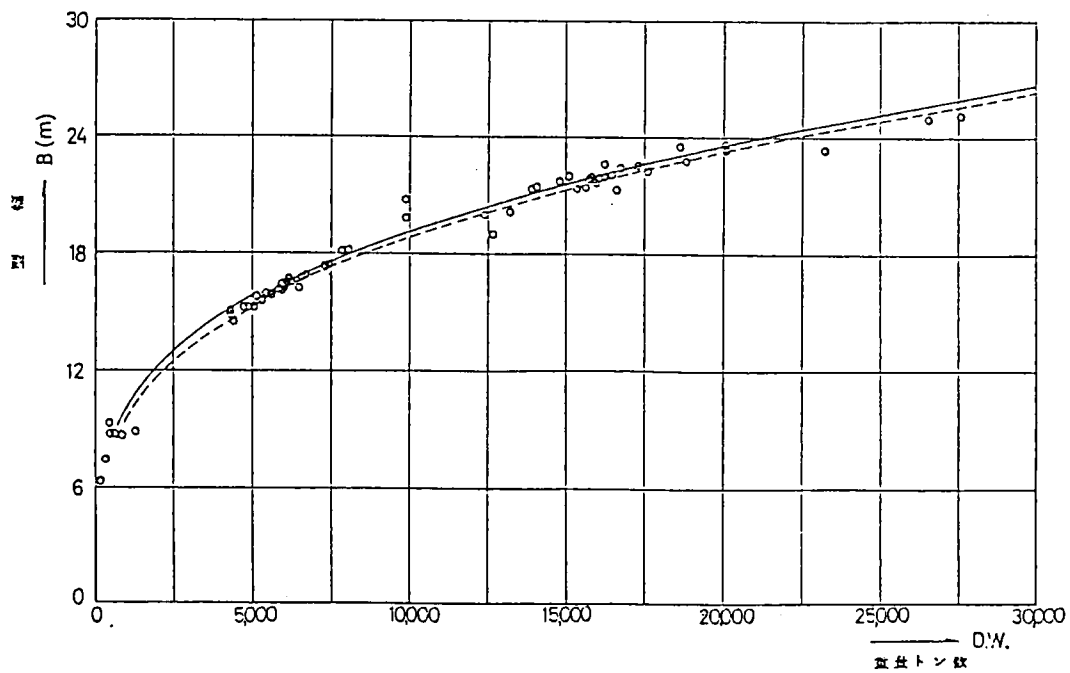


図-B.18 DW と B の関係 (木材専用船)

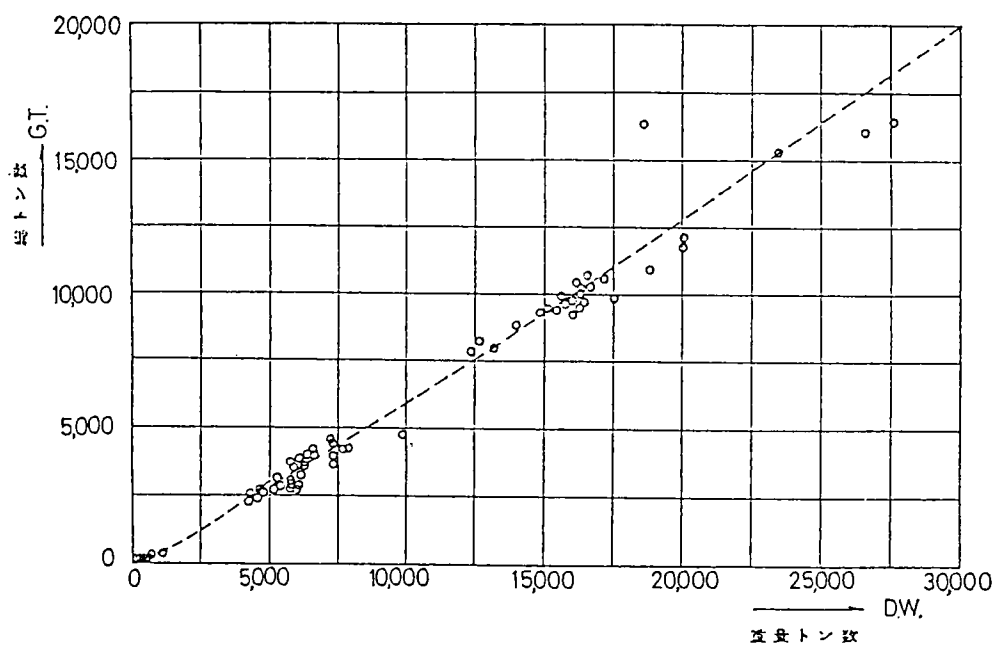


図-B.19 DWとGTの関係(木材専用船)

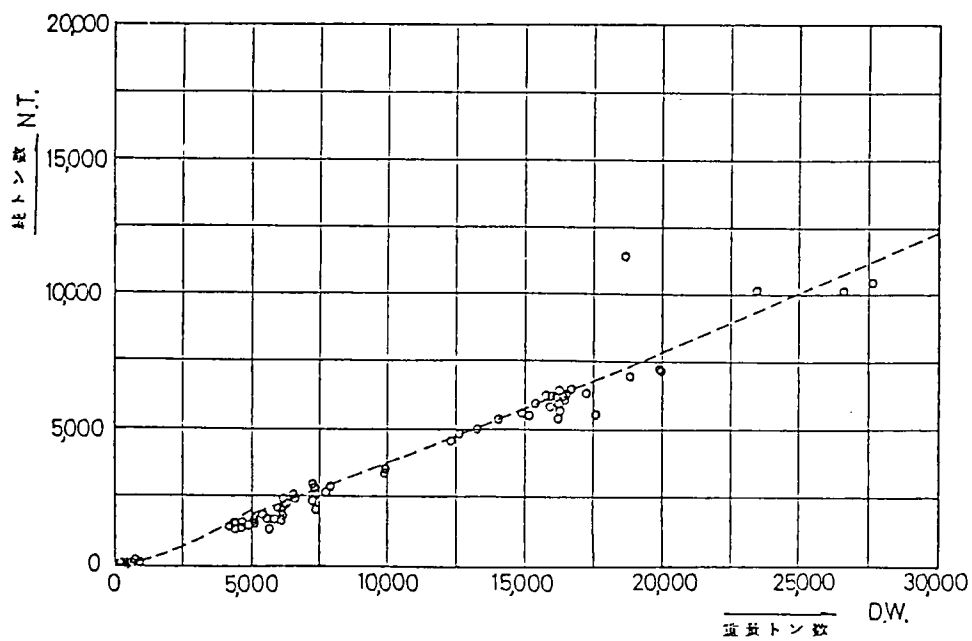


図-B.20 DWとNTの関係(木材専用船)

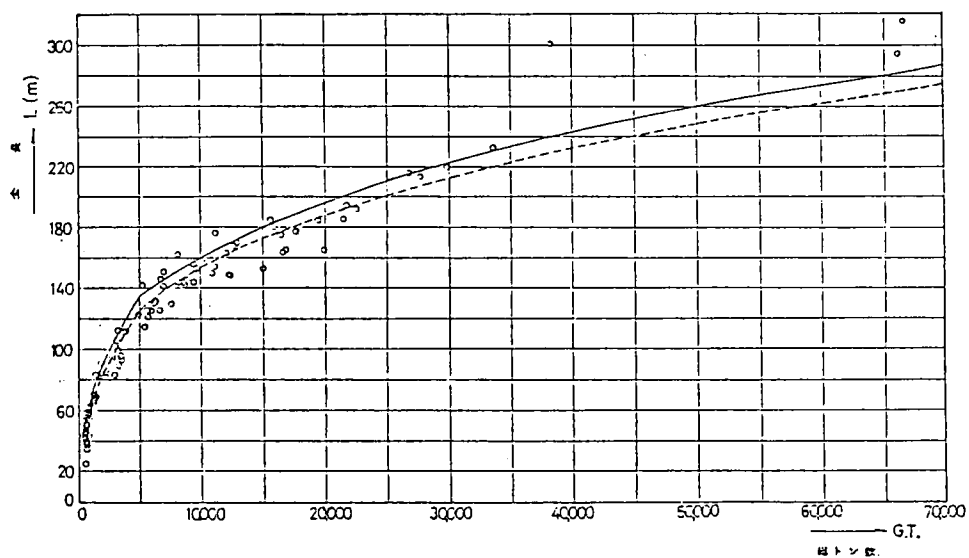


図-B.21 GTと L の関係(旅客船)

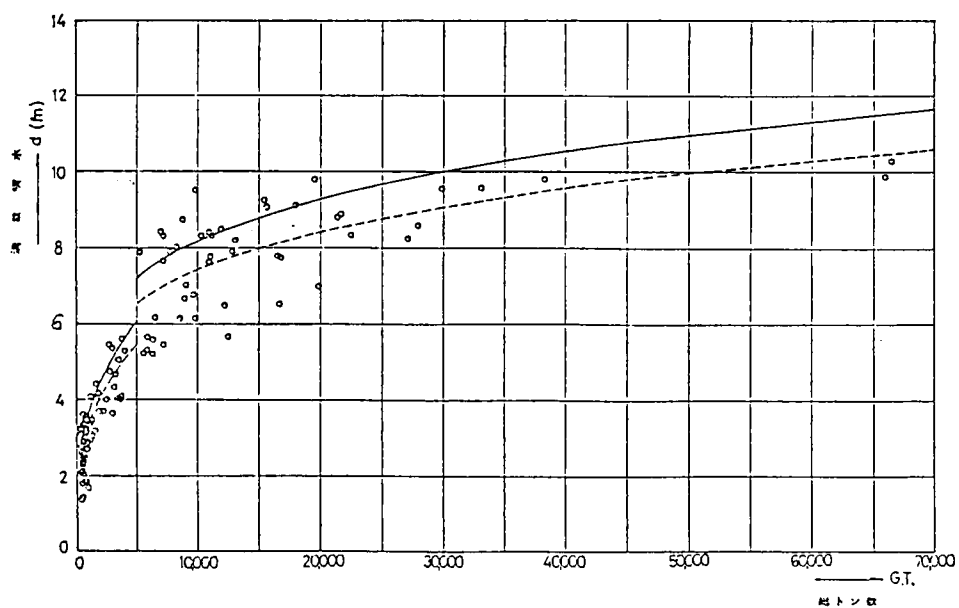


図-B.22 GTと d の関係(旅客船)

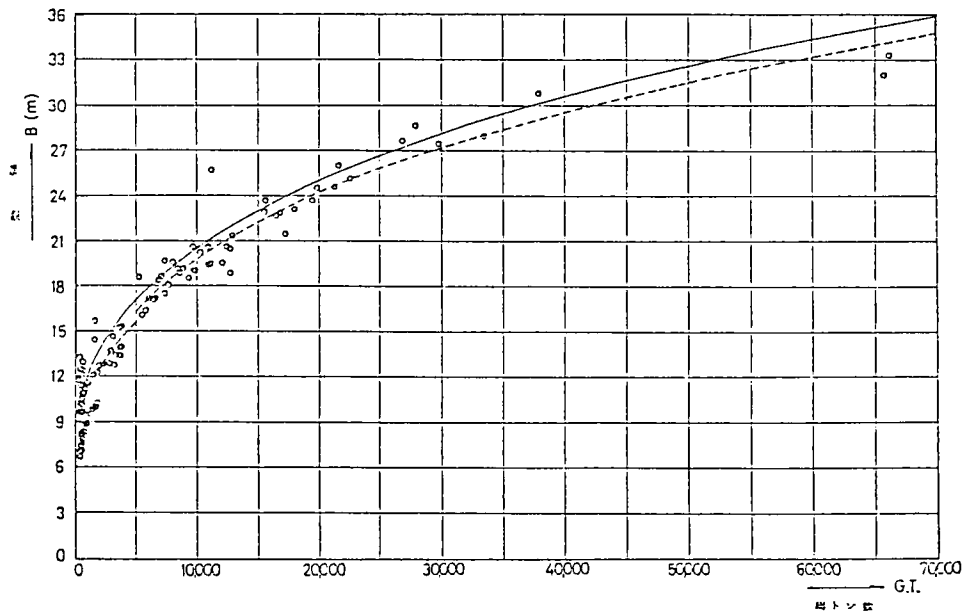


図-B.23 GTとBの関係(旅客船)

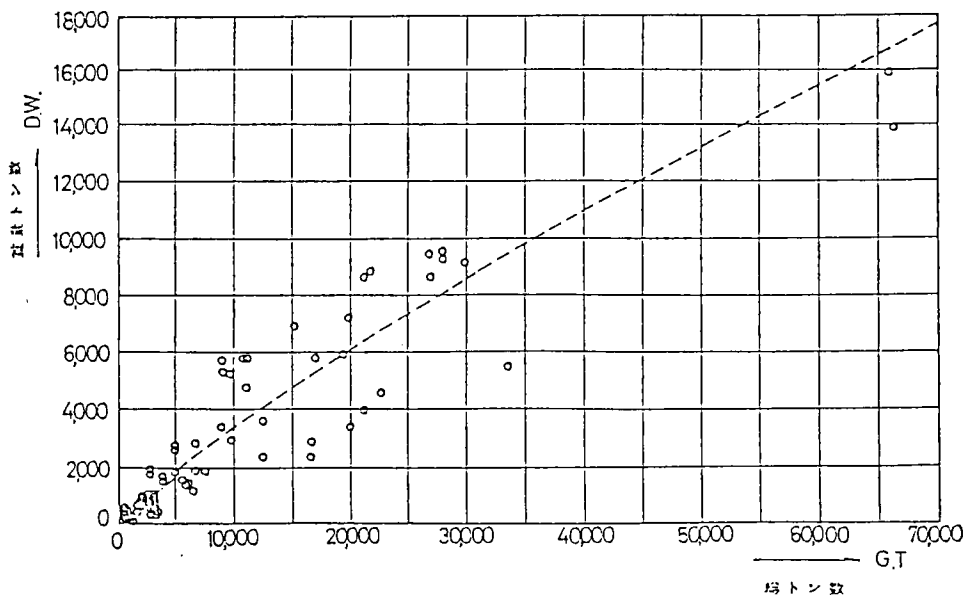


図-B.24 GTとDWの関係(旅客船)

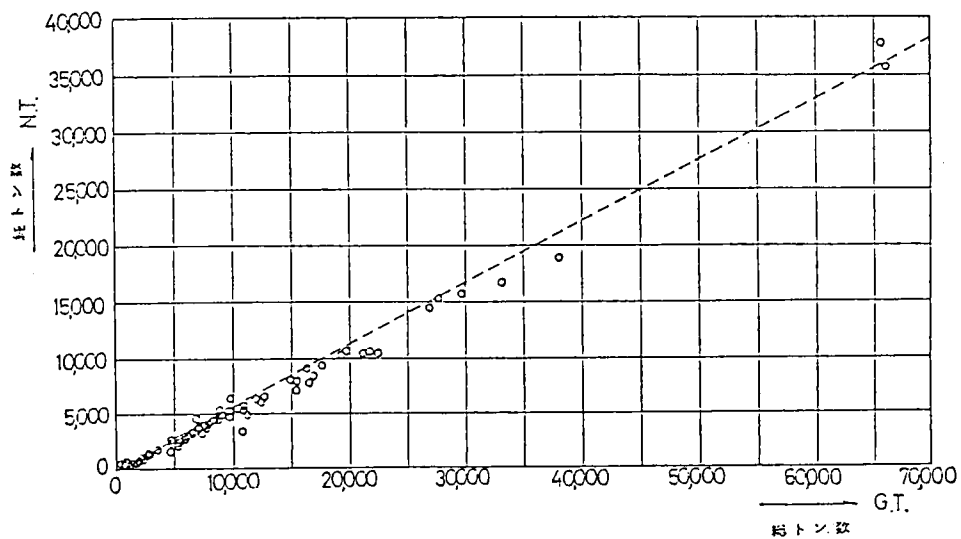


図-B.25 GTとNTの関係(旅客船)

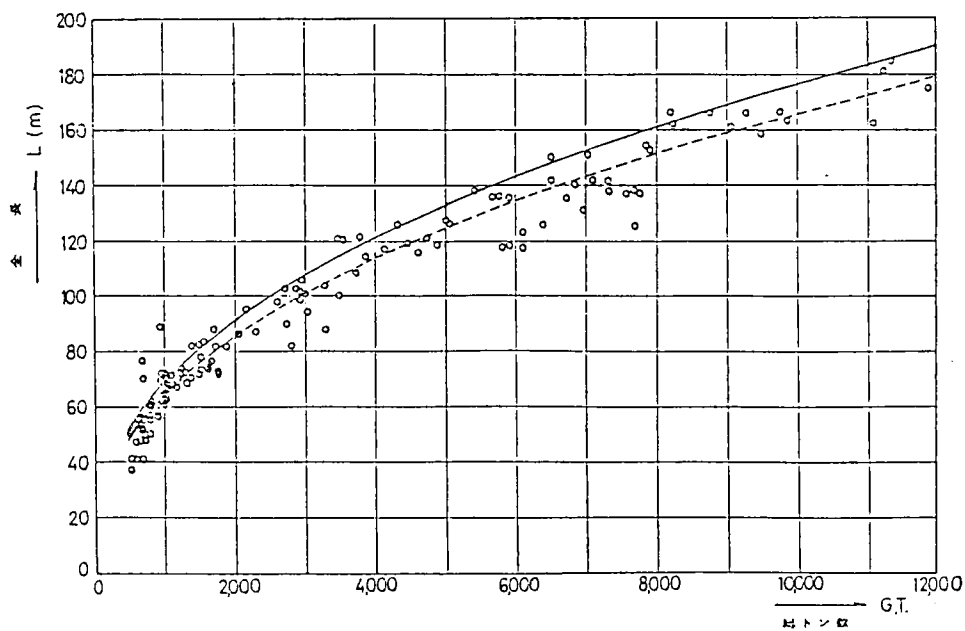


図-B.26 GTとLの関係(カーフェリー)

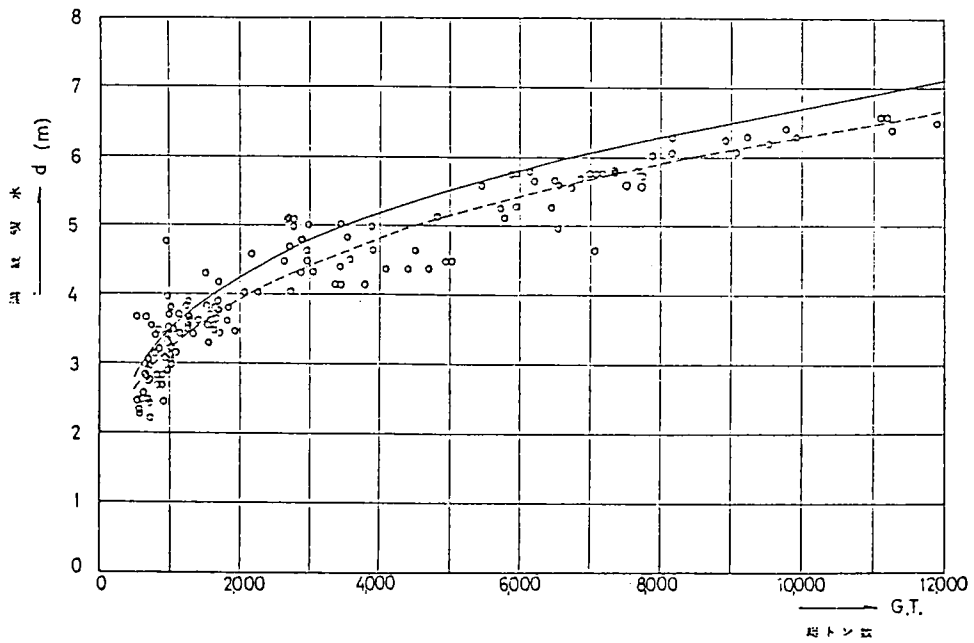


図-B.27 GTと d の関係(カーフェリー)

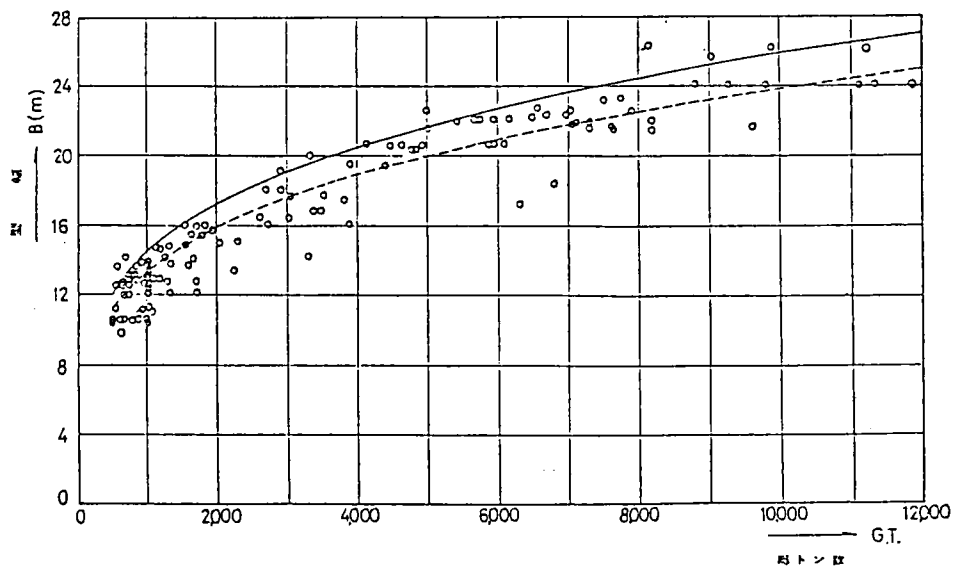


図-B.28 GTと B の関係(カーフェリー)

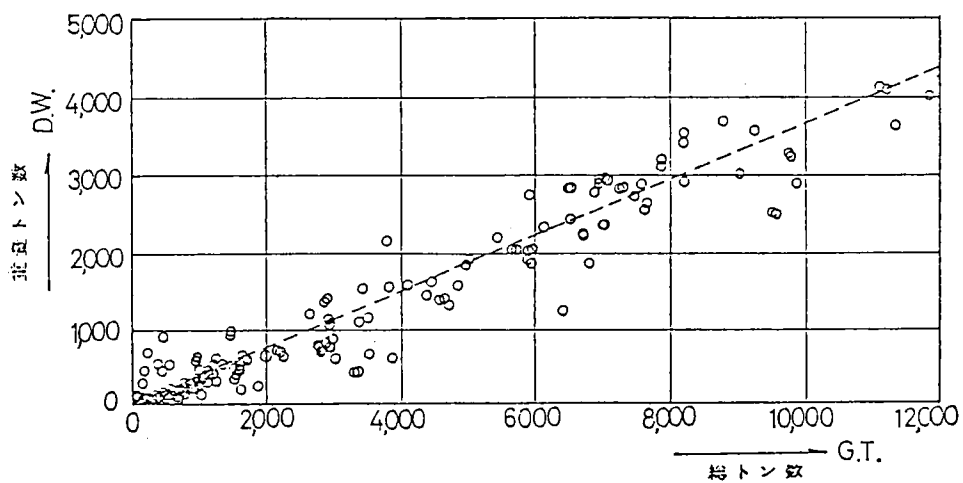


図-B.29 GTとDWの関係(カーフェリー)

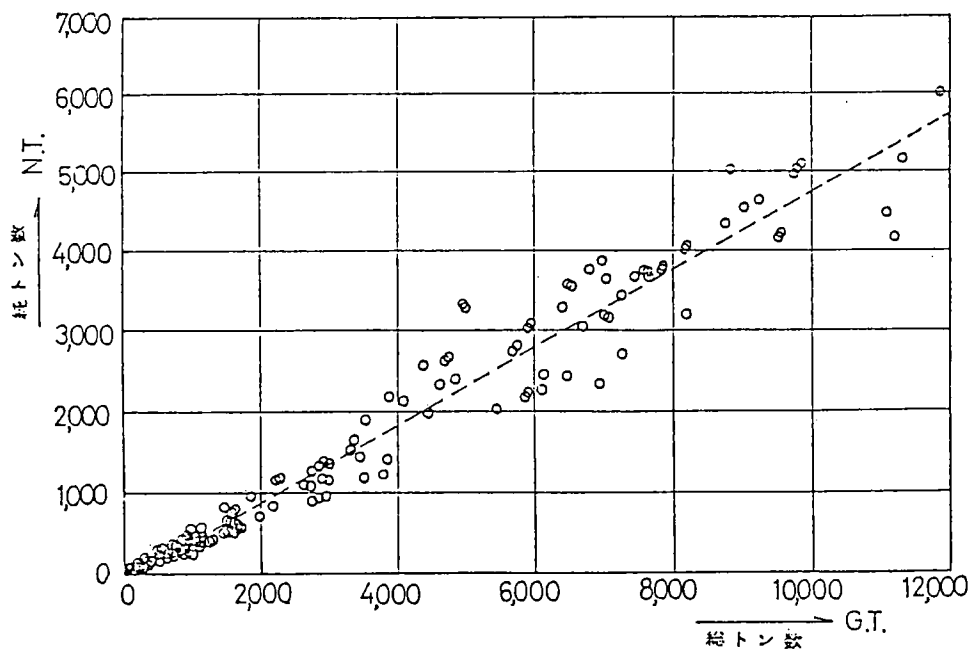


図-B.30 GTとDWの関係(カーフェリー)

付録 C 船型とマスト高の関係

1) 回帰式

回帰式のうち、GTは総トン数、Hは橋のマスト高（空船時）をあらわす。

表中の t^* は、付録Bと同様に $t(n-2, 0.001)$ の値である。

なお、データ数の右上の*印は、 $t_r < t^*$ のケースであり、相関の無いことを示す。カーフェリーとコンテナ

船の一部のトン階領域で、 $t_r < t(n-2, 0.001)$ となり相関のない状態がみられるが、3.5.3で述べたデータ処理をする関係で、求められた修正回帰式は無意味ではない。

2) 計算結果の図示

分布形と修正曲線を図示したものを図-C.1～図-C.5に示す。修正曲線は実線で表示してある。

表-C.1 GTとHの関係（一般貨物船）

デ ー タ 数		57	198*	60
トン階領域	G.T.	300-5,000	5,000-15,000	15,000-70,000
修正回帰式	a	0.555	1.263	1.339
	b	0.286	0.094	0.076
50%回帰式	a	0.606	1.153	0.903
	b	0.239	0.094	0.152
回帰の回りの標準偏差	σ	0.042	0.048	0.045
パラメータの標準偏差	σ_a	0.053	0.133	0.155
	σ_b	0.016	0.034	0.035
相関係数	γ	0.896	0.197	0.493
相関の検定	t_r	14.973	2.810	4.311
	t^*	3.483	3.291	3.469

表-C.2 GTとHの関係（石油タンカー）

デ ー タ 数		11	88	33
トン階領域	G.T.	500-10,000	10,000-50,000	50,000-150,000
修正回帰式	a	0.585	1.007	0.855
	b	0.248	0.143	0.175
50%回帰式	a	0.343	0.906	0.383
	b	0.312	0.143	0.258
回帰の回りの標準偏差	σ	0.060	0.047	0.038
パラメータの標準偏差	σ_a	0.102	0.127	0.237
	σ_b	0.031	0.029	0.048
相関係数	γ	0.958	0.472	0.692
相関の検定	t_r	10.035	4.965	5.336
	t^*	4.781	3.424	3.637

表-C.3 GTとHの関係(フルコンテナ船)

デ ー タ 数		10	14*
トン階領域	G.T.	4,000-20,000	20,000-60,000
修正回帰式	a	0.676	1.238
	b	0.219	0.088
50%回帰式	a	0.827	1.210
	b	0.177	0.088
回帰の回りの標準偏差	σ	0.016	0.043
パラメータの標準偏差	σ_a	0.097	0.324
	σ_b	0.024	0.071
相関係数	r	0.935	0.337
相関の検定	t_r	7.457	1.239
	t^*	5.041	4.318

表-C.4 GTとHの関係(旅客船)

デ ー タ 数		39	17
トン階領域	G.T.	300-10,000	10,000-30,000
修正回帰式	a	0.699	-0.063
	b	0.207	0.398
50%回帰式	a	0.685	-0.120
	b	0.207	0.406
回帰の回りの標準偏差	σ	0.685	0.026
パラメータの標準偏差	σ_a	0.048	0.176
	σ_b	0.014	0.041
相関係数	r	0.924	0.932
相関の検定	t_r	14.688	9.926
	t^*	3.580	4.073

表-C.5 GTとHの関係(カーフェリー)

デ ー タ 数		11*	20
トン階領域	G.T.	300-3,000	3,000-15,000
修正回帰式	a	0.585	0.927
	b	0.352	0.154
50%回帰式	a	0.661	0.902
	b	0.205	0.154
回帰の回りの標準偏差	σ	0.080	0.030
パラメータの標準偏差	σ_a	0.259	0.131
	σ_b	0.091	0.034
相関係数	r	0.602	0.729
相関の検定	t_r	2.262	4.514
	t^*	4.700	3.922

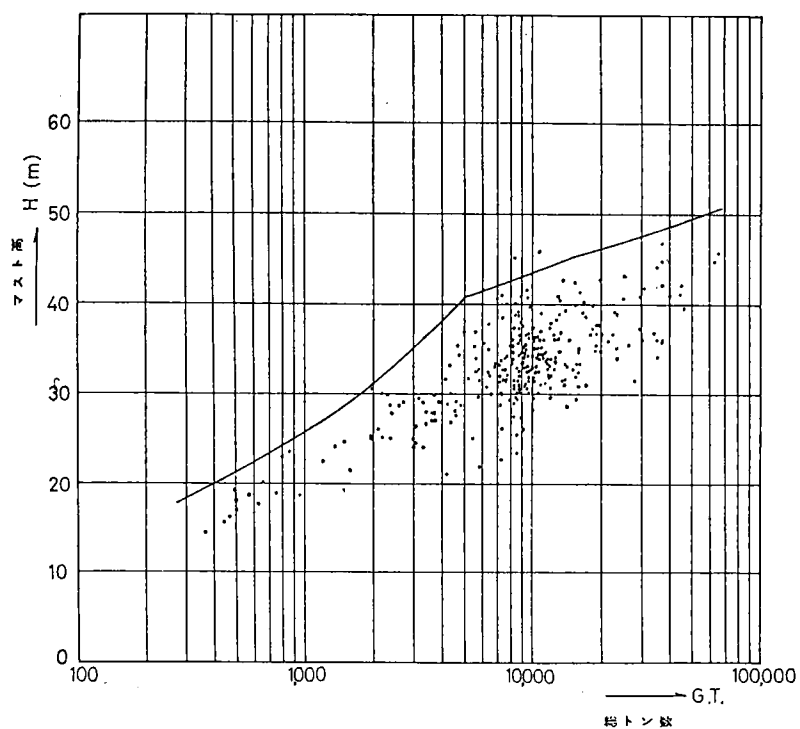


図-C.1 GTと H の関係(一般貨物船)

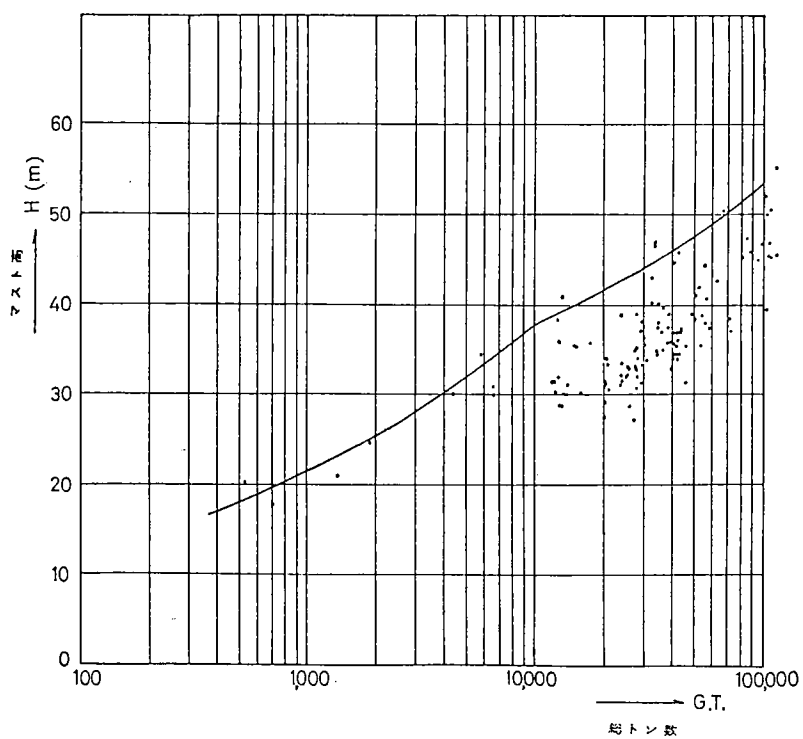


図-C.2 GTと H の関係(石油タンカー)

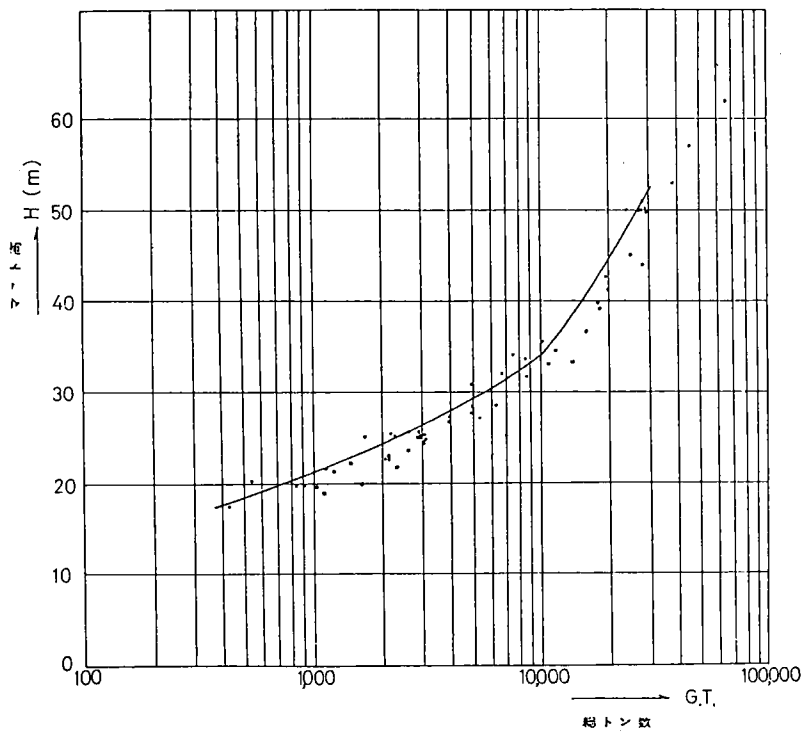


図-C.3 GTとHの関係(フルコンテナ船)

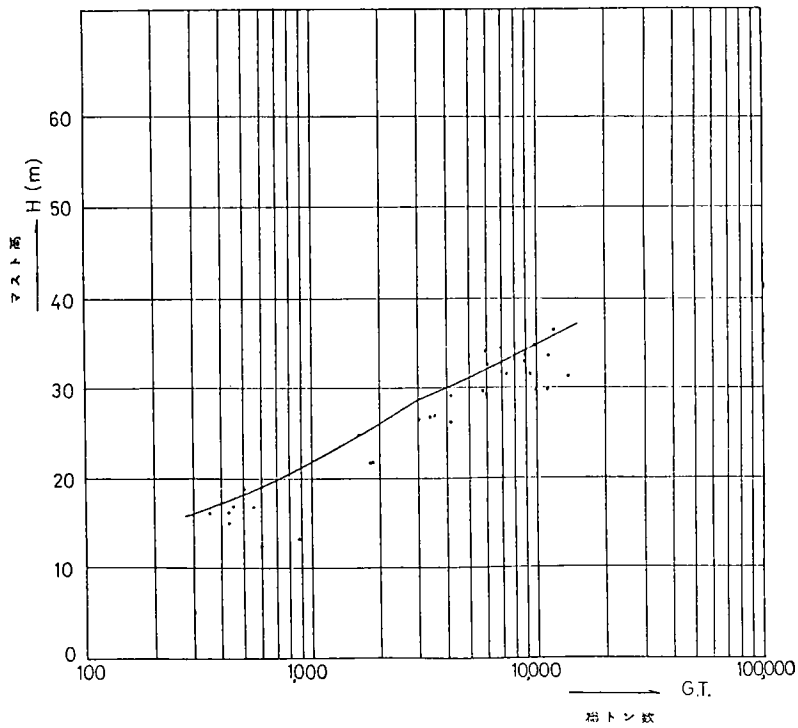


図-C.4 GTとHの関係(旅客船)

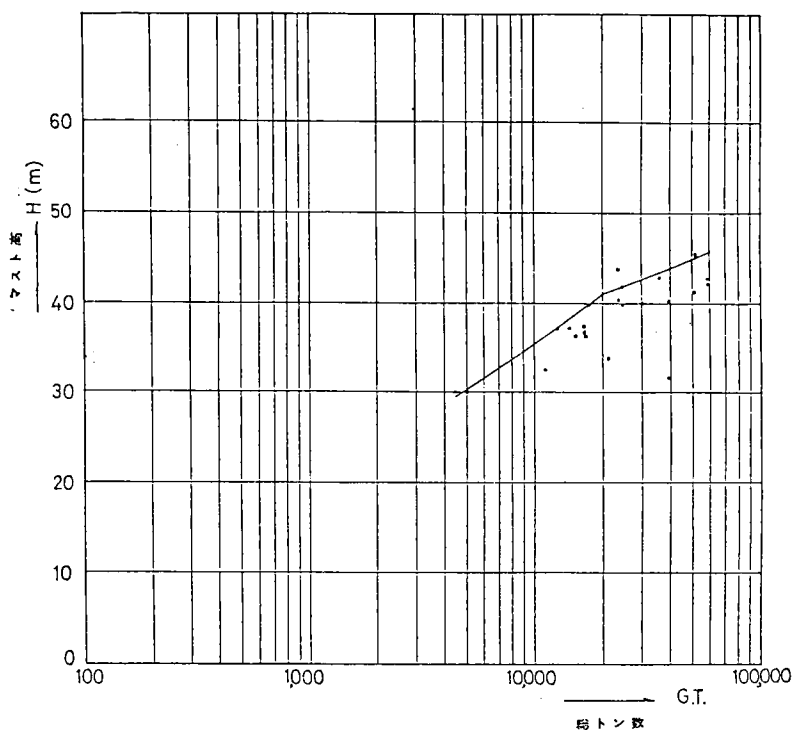


図-C.5 GTと H の関係(カーフェリー)

付録 D 実態調査による L^2 換算密度とネットワーク・シミュレーションによる利用率の関連について

海上交通実態調査においては、航跡図、速力分布図、ゲートライン通過隻数図、密度分布図を求めることが一般的である。密度分布図は、単純隻数密度、 L 換算密度、 L^2 換算密度等を求めており、他の3種の解析結果と比較すると若干わかりづらいくらいがある。

すなわち、航跡図は、流線図ともよばれるように、航行船舶の軌跡を描いた図であり、速力分布図は、海域に一本の基線を設けて、そこを通過した船舶の速力の頻度図とも考えられるし、ゲートライン通過隻数図は、海域に設けられた基線をいくつかに分けてその各線分を横切った船舶数の頻度図であって、直感で理解される解析結果である。

それに対して、密度分布図は、海域に格子の網をかぶせて、その一つ一つの四角形の中に船舶の中心位置が滞在している時間の総和を観測時間全体で除しさらにそれを 1 km^2 値に換算した値である。以上の説明は単純隻数密度の場合であるが、滞在時間にその船舶の全長 L を乗じて総和をとって L で除せば、 L 換算密度であり、 L^2 を乗じて総和をとって、同様の処置をすると L^2 換算密度となる。実際には、船の長さ(L)の重みをきめており、標準船を100 G/T以上500 G/T未満の船舶として、標準船に換算した隻数で、換算密度の値とすることも多い。

このようにして密度分布図は作成されているので、単純隻数密度の場合は、巨大船も小型船も同じ1隻であるから、同時に、船型別分布が与えられていない限り船舶の輻輳の度合いを推測することは非常に難しい。船型別分布は、交通量から求めることは可能であるものの、それはあくまでも広大な海域における分布であり、個々のメッシュにおける分布ではない。船型に応じて通航海域が異なる場合にはメッシュごとに船型分布を求めることは不可能であるといえよう。

L 換算密度の場合は大きさに応じて重みづけがなされており、交通の輻輳度を示す値としてある程度の妥当性はあるといえる。しかし、海上交通において、船舶が安全に航行するためには、進行方向ばかりでなく、進行方向に直角な横の方向も考慮しなければならないことも多い。すなわち、 L 換算密度で与えられた隻数は長さについての平均隻数を与えるが、はっきりと輻輳の度合いを示していない。この場合、もしも海域における船舶交通が、一直線上に航行して2隻以上の併航を許さない場合には、 L 換算密度で容易に輻輳の度合いを推定できるこ

とが理解されよう。

L^2 換算密度の場合は、進行方向と横方向を考慮した換算隻数であるといえる。ここでは、それをネットワーク・シミュレーションにおける海域の利用率との関連で説明する。

ネットワーク・シミュレーションにおける海域の利用率とは、航路部分(リンク)に限定すると、航路の水域面積 S は対象時間 T が与えられているとして

面積 $S \times$ 対象時間 T

を分母におく。次に、対象時間内に通航した船舶の長さを L_i とすると、船舶は水域を進行方向 $a \times L_i$ ；横方向 $b \times L_i$ だけ利用する。しかもその領域は他船とだぶらないときめて、船舶の中心位置がその航路内に滞在する時間を t_i としたとき、

$$\sum_i a \times L_i \times b \times L_i \times t_i$$

を分子とする。すなわち、利用率 ρ は、

$$\text{利用率 } \rho = \frac{\sum_i a \cdot b \cdot L_i^2 \cdot t_i}{S \cdot T} = \frac{ab \sum_i L_i^2 t_i}{S \cdot T}$$

で定義される量である。これは、われわれがもつ利用率の概念と完全に一致する量である。 a 、 b は海上交通特性、もしくは観測から与えられるが、普通は $a = 8$ 、 $b = 3.2$ をとっている。ここで、 L_i は実際の船舶の全長であり、標準船を1とした重みではない。

L^2 換算密度の式は、重みでなく実際の船舶の全長 L_i を用いると、標準船の全長を L として、

$$L^2 \text{ 換算密度 } d = \frac{\sum_i \left(\frac{L_i}{L}\right)^2 \cdot t_i}{T} \text{ である。}$$

両者を比較するにあたっては、航路面積 $S = 1 \text{ km}^2$ 、メッシュ面積も 1 km^2 として考察しても差しつかえないことから

$$\rho = \frac{a \cdot b \cdot L^2}{1 \text{ km}^2} \cdot d$$

の関係式が成立する。 $a = 8$ 、 $b = 3.2$ 、 L は100 GT～500 GTの船舶の全長であるから、例えば

$$L = 40 \text{ m とすると、} \rho = 0.04 d,$$

$$L = 50 \text{ m とすると、} \rho = 0.064 d$$

の関係が成立する。

1981年の日本船舶明細書によれば、100～500 GTの商船は5,947隻あり、平均全長は42.104 mである。

ネットワーク・シミュレーションにおいては、 ρ の値

は輻輳海域で0.1，最大値で0.2～0.3となる場合も生ずる。したがって， $\rho = 0.1$ の場合，換算密度 d は，

$$L = 40 \text{ m のときは } d = 2.5 \text{ 隻}$$

$$L = 50 \text{ m のときは } d = 1.6 \text{ 隻}$$

であるから，この値で輻輳しているといえよう。

このようにして， L^2 換算密度から海域の利用率が求まり，輻輳水域が得られる。

また，リンクの利用率の計算において，リンクの長さを0に近づけることにより，ノードの場合における利用率に一致することが容易に確かめられ，ノードの利用率と L^2 換算密度の関係も同じように求められる。

L^2 換算密度は，定義式からも容易にわかるように，おのおのの船舶の進行方向の方向性が失われてしまう量である。したがって，同方向船のみが航行するメッシュの場合は輻輳度を推測することが可能である。しかし，異方向の船舶が同一メッシュ内を航行する場合は，メッシュ内の航行船舶の隻数についての情報は得られても航行の困難度を示していない。したがって，今後それらを加味した万人が納得する量の確立が期待されよう。一例として，方向別の密度を求めて，その積を図示することによって操船の困難度を示した例もある。

付録 E 水域計画シミュレータの視覚部

7.で取扱った水域計画シミュレータの操作は、電子計算機によって描かれる平面図によって実行される。ここでは、その部分の景観図化の試みを取扱いその有用性を検討する。

事例として、横浜港大黒ふ頭のコンテナバースに、大型コンテナ船が入港する際に周囲の景観が船舶のブリッジからどのように見えるかといった、景観予測手法を取扱う。この手法は、シミュレータの視覚部に応用可能である。

港の平面図は図-Eである。

操船の難しさは、

- (i) 港内で既に船速が遅くなっているのに左へ曲らなければならないこと。
- (ii) 左折してコンテナバースへ直接船首を向けることは、在来貨物船バース前面が水深が浅いこと（点線内）から無理なので、いったん外側へ向けてから最後に再び右へ向けて停止せねばならない。
- (iii) 両側に広大な余裕水域がないことに加えて、前方にはマスト高より桁下高の低い橋があり、心理的の圧迫感がある。

このように、手前に水深の浅いバースのある最奥部にコンテナバースは位置し、しかも、そのすぐ前方にはマ

スト高より桁下高の低い橋がある。そこに、吃水の大きい大型コンテナ船が接岸することになったのは、扇島（図の右側）から大黒ふ頭を通して本牧ふ頭（図の左下側）へ向かう東京湾沿岸道路計画によるものである。当然のことながらコンテナバースの供用に先だって、操船面からの検討がなされた。その検討の一つとして、ブリッジから回りの状況がどのように見えるかという問題が提起された。

この点に関して、小さな船から眺める景観と、ブリッジの高さがバースの上屋の2階よりも高い30 m近くにもおよぶ図体の大きいコンテナ船から眺める景観とは全く異なることから、電子計算機によって景観図を作成し、それを見て、視覚的圧迫感の評価を行うこととした。

そのためにまず周辺の地形データ、物体データを収集し、景観の基となる景観原型を作成した。

景観原型内の主なものは、地形、地盤の高さ、橋、在来貨物船バース上の4棟の上屋、火力発電所（石油タンク、煙突、発電所等）である。

検討に先だって、コンテナバースへ大型船が着岸しようというときに操船者にとって望ましい航行経路を提案してもらい、その経路にそって景観図を作成することとした。

望ましい船舶の接岸に至る経路は、図-Eの1-2-3-4-5-6-8および1-2-3-4-5-6-7

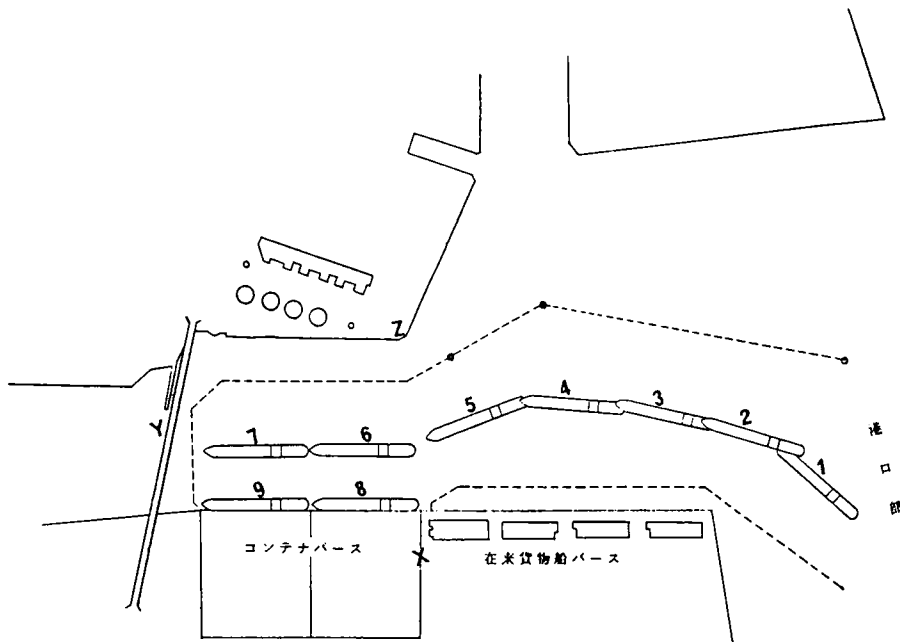


図-E 大黒ふ頭コンテナバース周辺の平面図

ー9であり、おのおのの数字の位置における船舶のブリッジ中央から図-EのX, Y, Z点を眺めた図面およびブリッジ甲板左側からX点を、ブリッジ甲板右側からZ点を眺めた図面を作成した(図-E 1.a~図-E 9.f)。おのおのの図において、Eの次の1~9は図-Eの船の位置を示す数字に対応し、その次のaはその位置に船舶がいるときの鳥瞰図であり、bはブリッジ甲板左端からX点を、c, d, eはおのおのブリッジ中央からX, Y, Z点を、fはブリッジ甲板右端からZ点を眺めたときの景観図である。

これらの図をもとに、スライドでたて3mに拡大し、その映像を運航関係者に正しい位置(画像の大きさおよび画角が実際の大きさおよび画角と等しくなる位置)から眺めてもらって景観上の検討をした。

検討の結果、つぎの事項が指摘された。

- i) 実際の航行にあたっては、在来貨物船バースに船舶が接岸していたり、小型船が水域内を航行している。それらを考慮することの可能性。
- ii) コンテナ船は夜間に入港しないと思われるが、一般的にこのような試みを行う場合に、夜間入港の際に生ずるバース背後の港町の灯の影響を考慮することの可能性。
- iii) 波と風の影響がこれではわからない。それらは着岸の際に非常に操船の難易度に影響する。
- iv) 眺める方向については、ここではX, Y, Z点と固定したが、船首方向と着岸しようとするバースの方向は是非必要である。
- v) 浮標だけでなく、水深の境界である図-Eの破線を必ず景観の中に入れる。

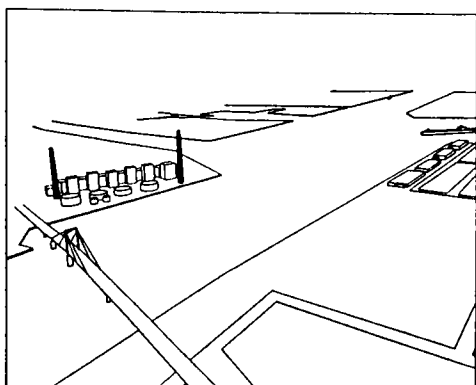
i), iv) およびv) は、眺める地点および眺める方向を変えるだけで対応が可能である。i), v) については景観の中に対象物体を入力しさえすればよい。ii) とiii) は別のアプローチが必要であるが、iii) に関しては、視覚部分でなく、波、風および他船をも考慮した船舶の操船シミュレータそのものである。

以上の検討結果のまとめとして、

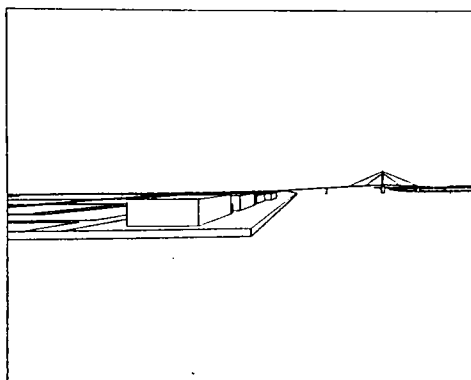
vi) この種の試みは初めてであるが、新たに港を造ろうとするとき、あるいは造ったときに、水面上2~3mの高さの小型船でみて回っても大型船の実感は把えることはできないので、大型船を想定して行くと臨場感が伴って非常に参考になることが強調され、とくに今回のようにふ頭の供用開始直前ではなく、港湾の計画の段階で行えばさらに有意義である。

参 考 文 献

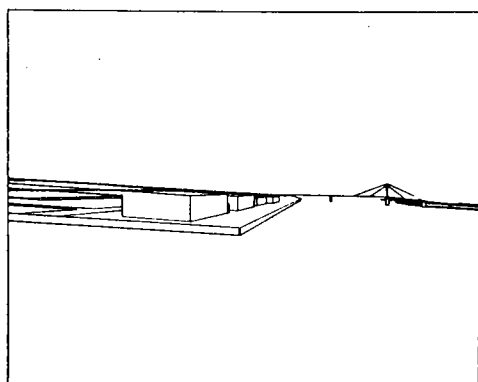
- 1) 奥山育英：港湾における空間設計手法の開発(第1報)、—基本図形の景観図化—、港湾技術研究所報告、第15巻第1号、1976年、pp.19~38.
- 2) 奥山育英、佐々木芳寛：港湾における空間設計手法の開発(第2報)、—任意形状物体および地形の景観図化—、港湾技術研究所報告、第15巻第4号、1976年、pp.75~93.
- 3) 奥山育英、梅山珠実、佐々木芳寛：港湾における空間設計手法の開発(第3報)—入力方法の容易化と港湾計画への応用—、港湾技術研究所報告、第22巻第1号、1983年、pp.301~324.



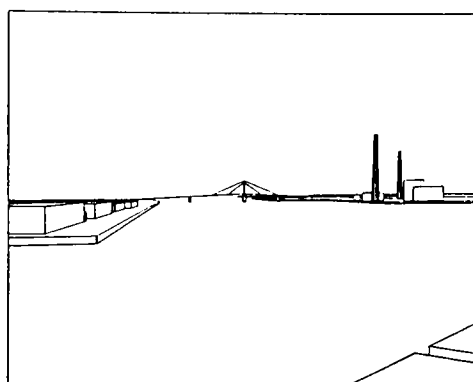
(a)



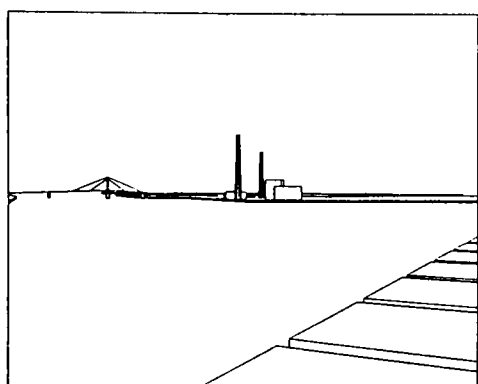
(b)



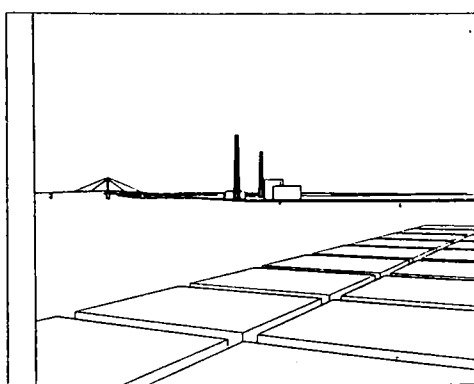
(c)



(d)

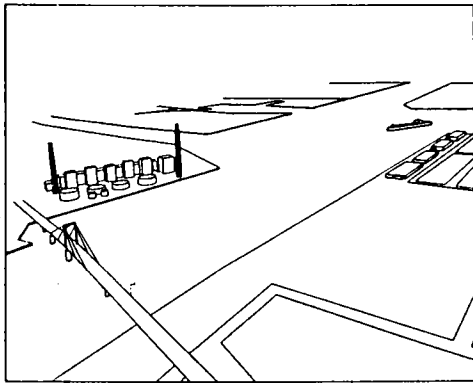


(e)

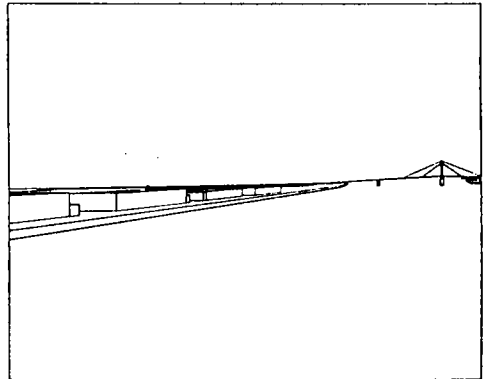


(f)

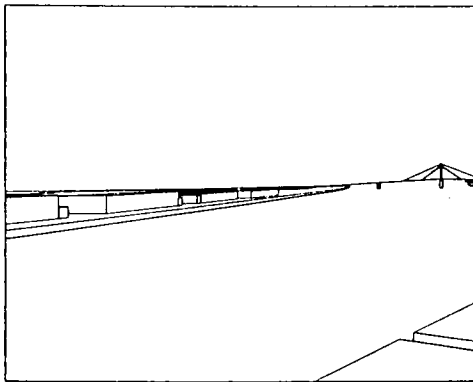
図-E.1 コンテナ船ブリッジからの視界(位置1)



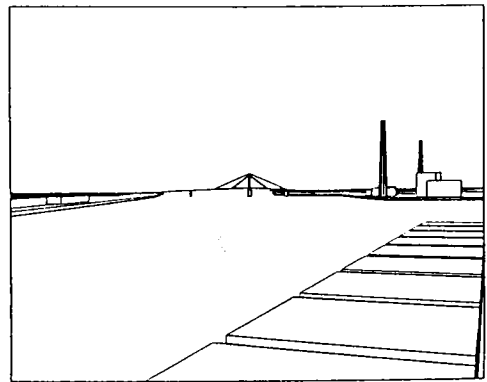
(a)



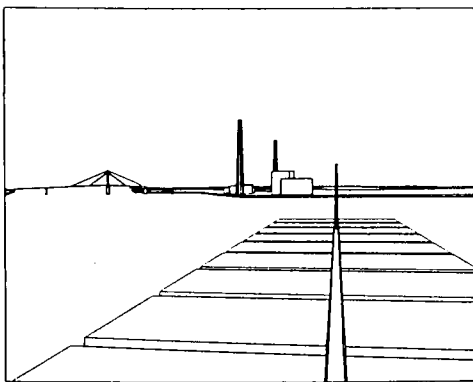
(b)



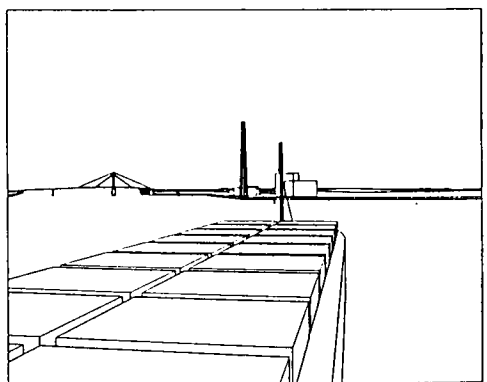
(c)



(d)

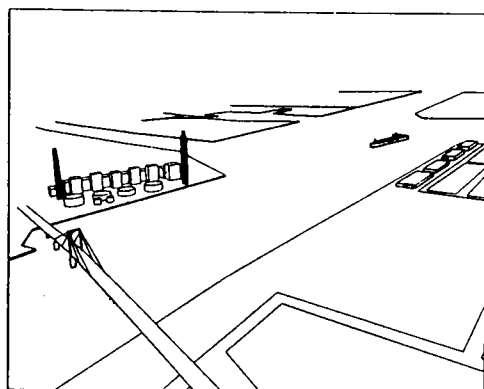


(e)

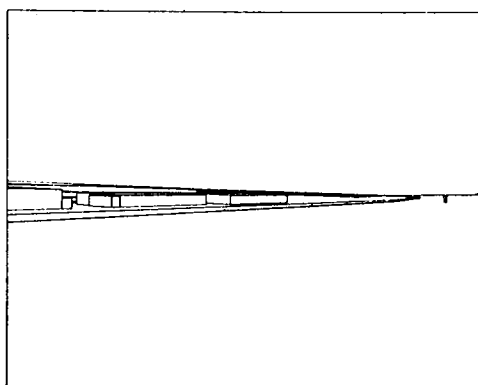


(f)

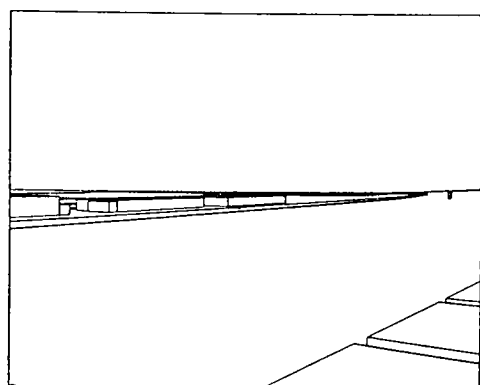
図-E.2 コンテナ船ブリッジからの視界(位置2)



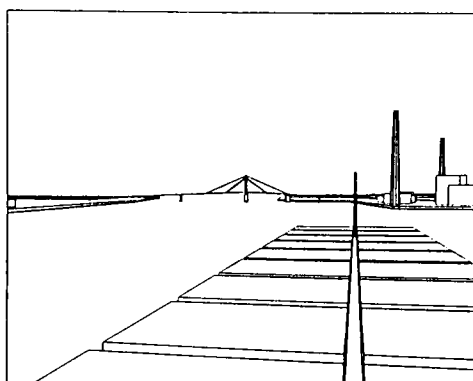
(a)



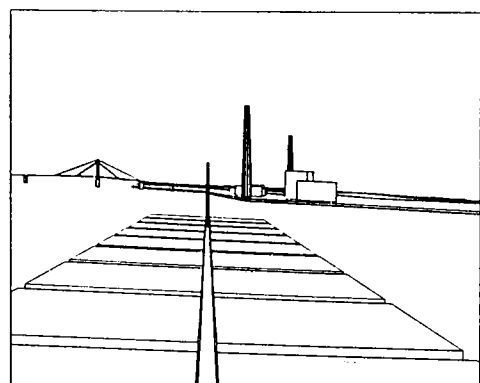
(b)



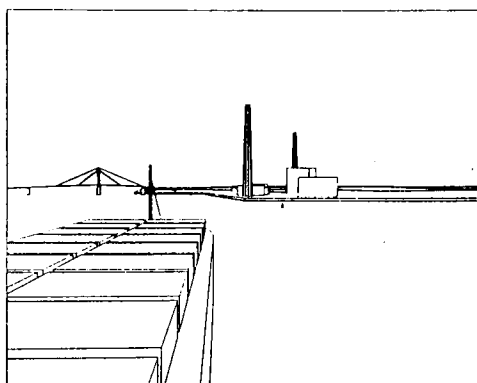
(c)



(d)

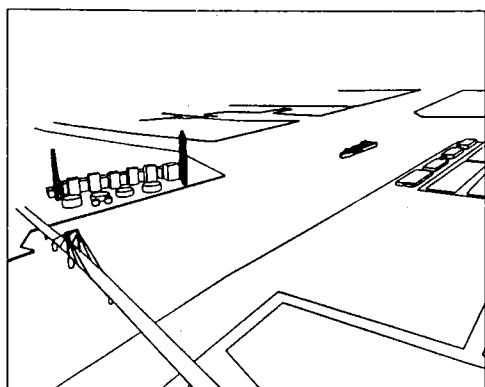


(e)

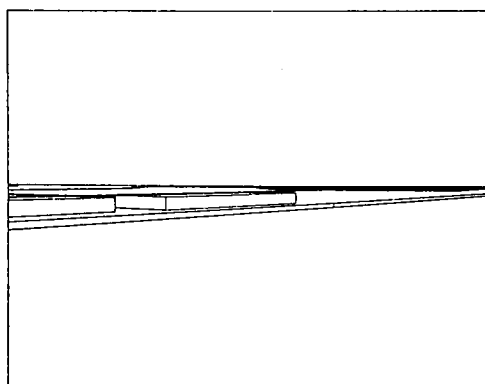


(f)

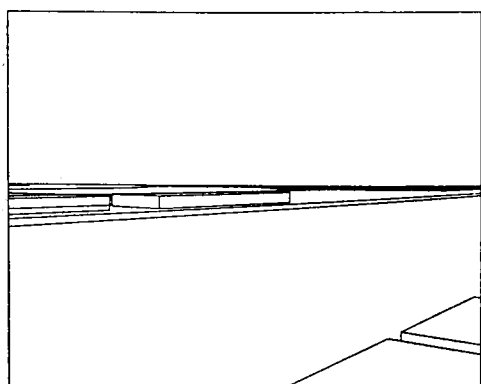
図-E.3 コンテナ船ブリッジからの視界(位置3)



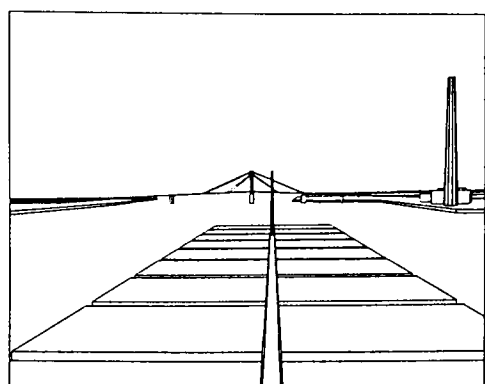
(a)



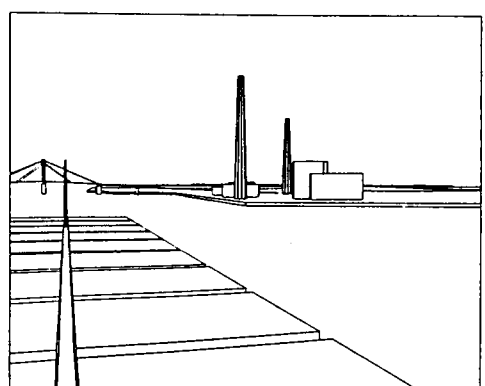
(b)



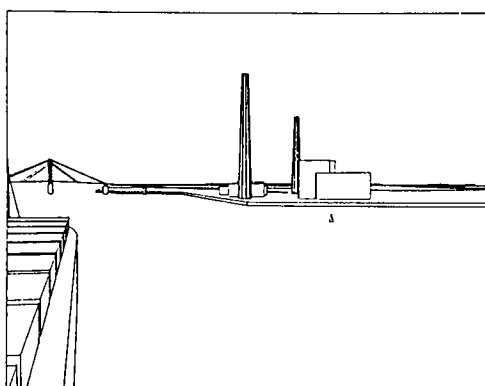
(c)



(d)

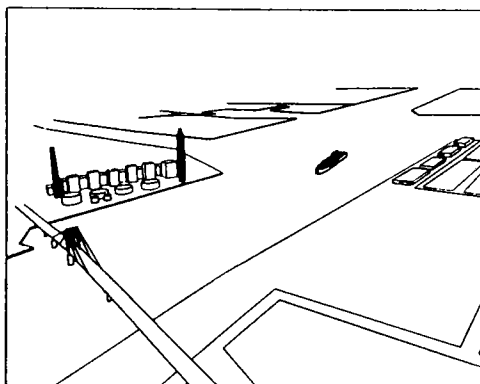


(e)

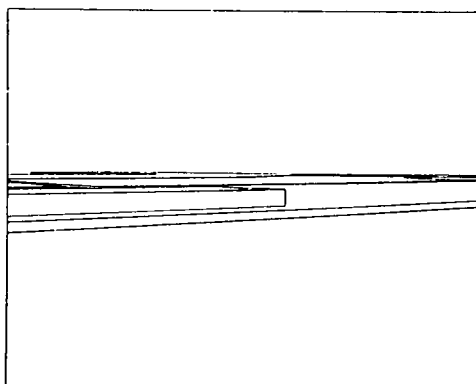


(f)

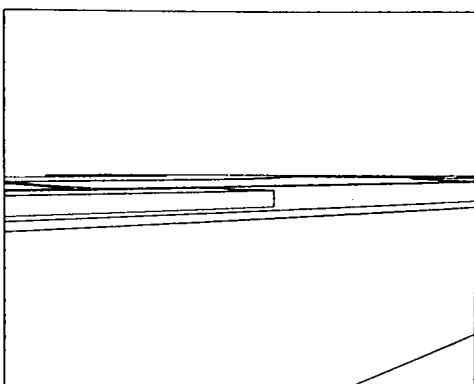
図-E.4 コンテナ船ブリッジからの視界(位置4)



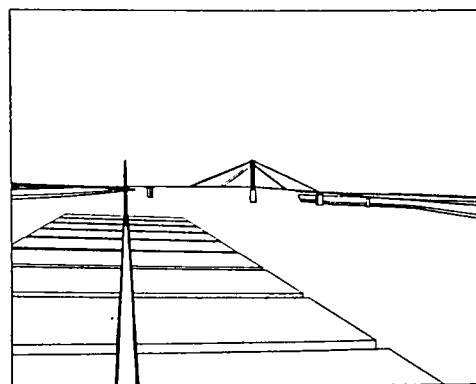
(a)



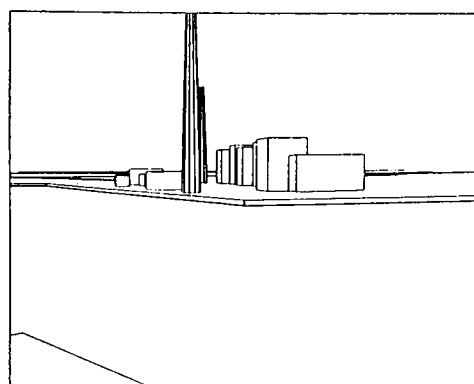
(b)



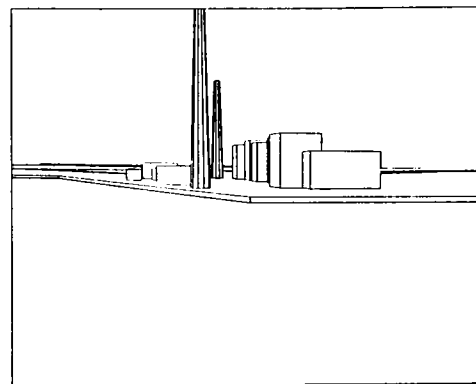
(c)



(d)

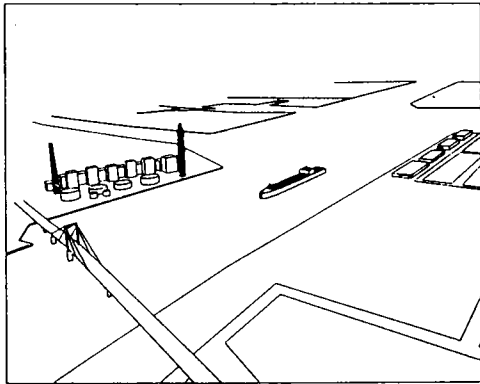


(e)

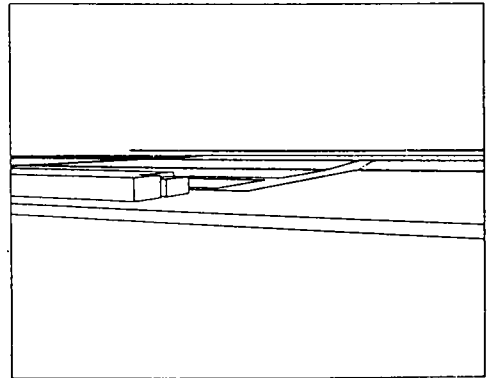


(f)

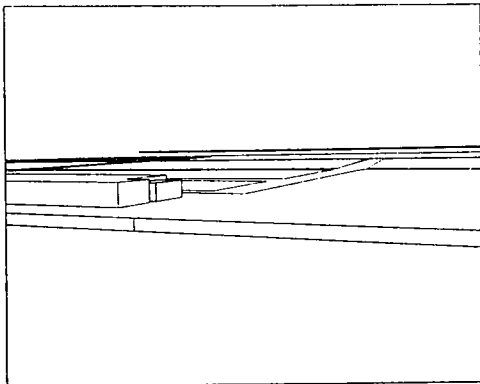
図-E.5 コンテナ船ブリッジからの視界（位置5）



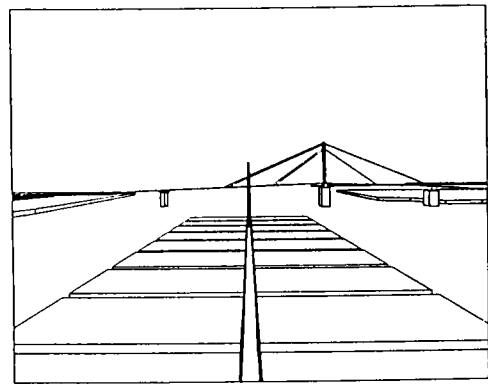
(a)



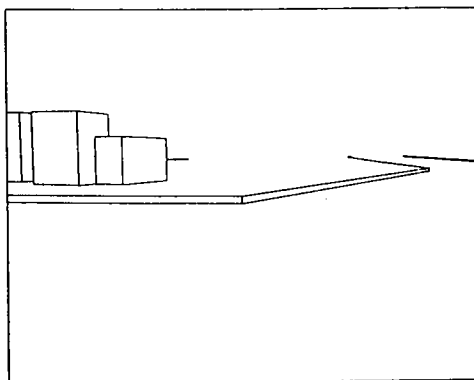
(b)



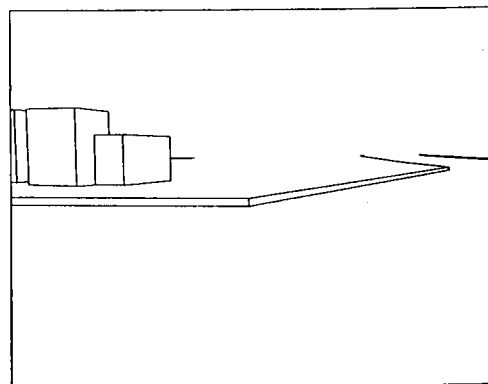
(c)



(d)

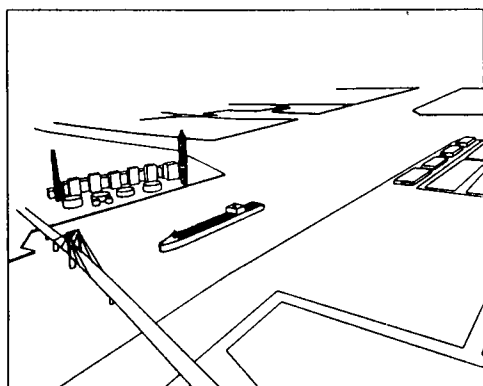


(e)

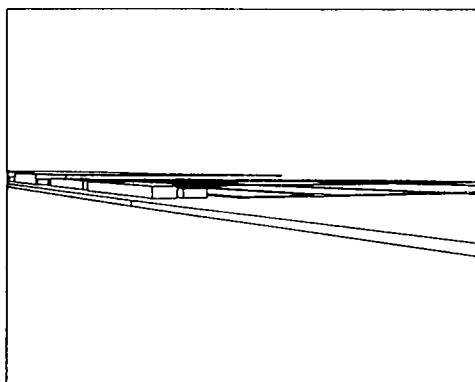


(f)

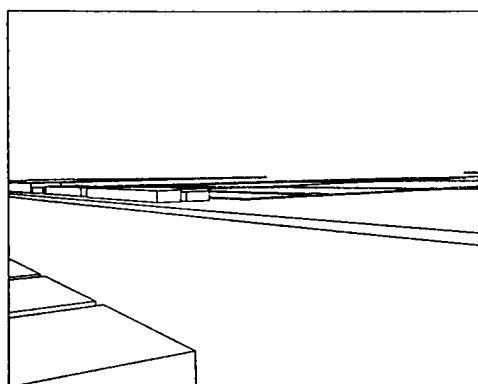
図-E.6 コンテナ船ブリッジからの視界（位置6）



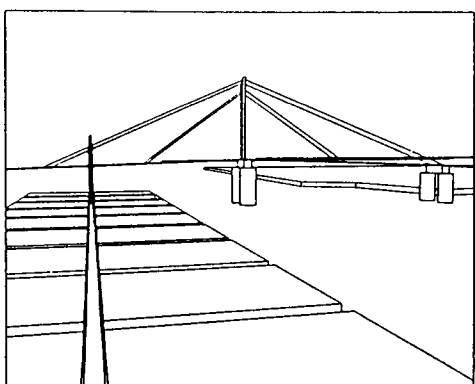
(a)



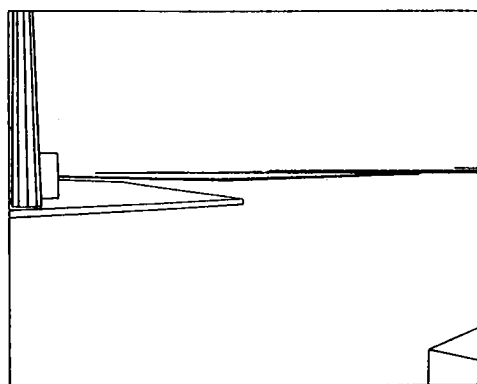
(b)



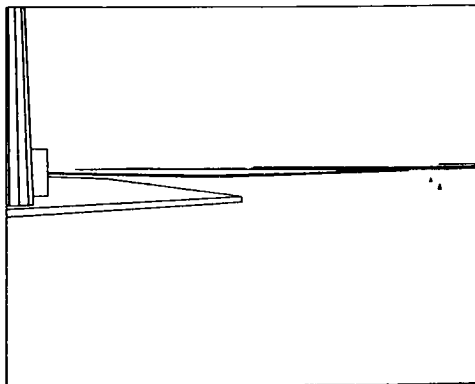
(c)



(d)

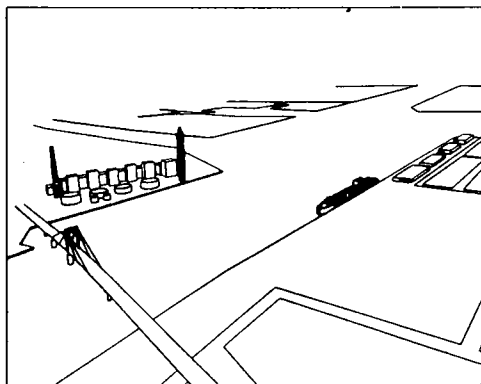


(e)

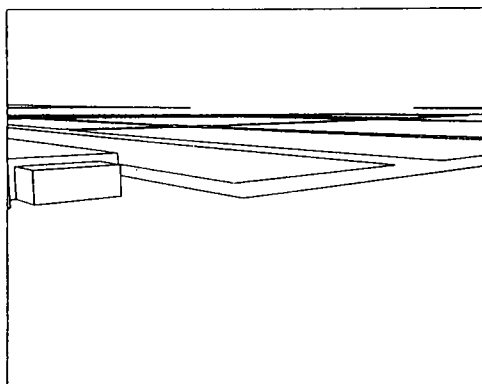


(f)

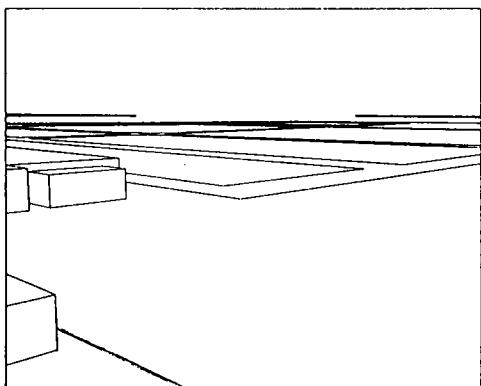
図-E.7 コンテナ船ブリッジからの視界(位置7)



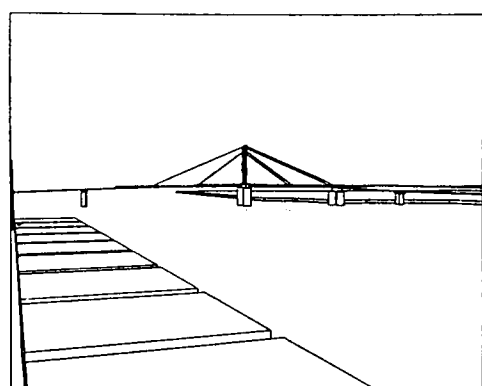
(a)



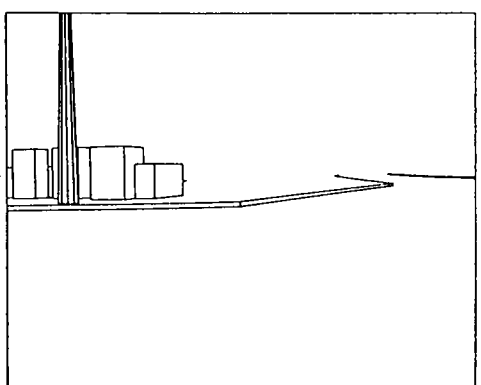
(b)



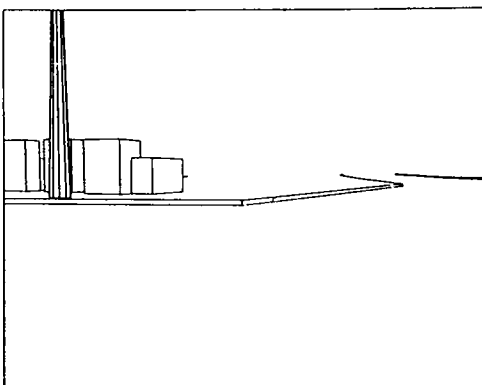
(c)



(d)

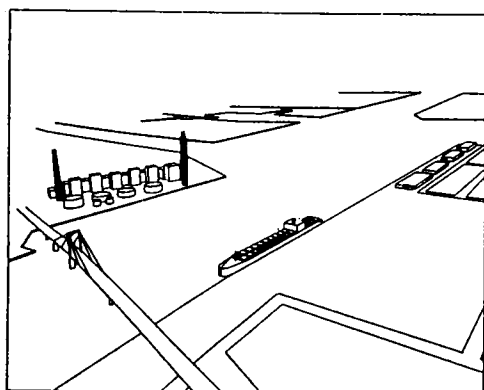


(e)

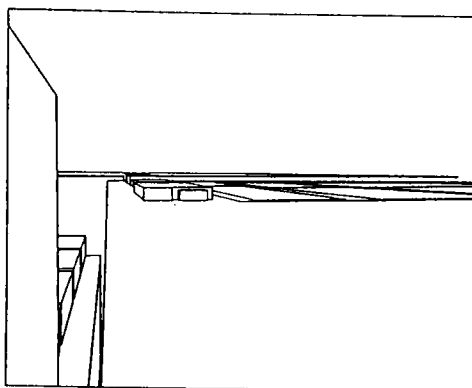


(f)

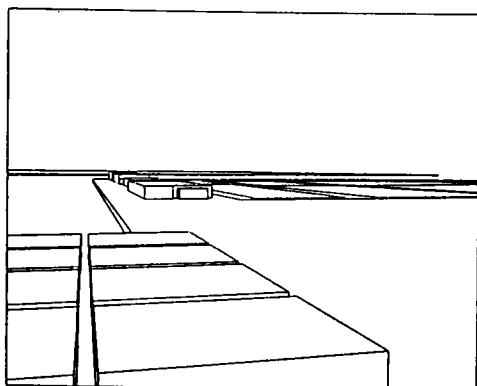
図-E.8 コンテナ船ブリッジからの視界(位置8)



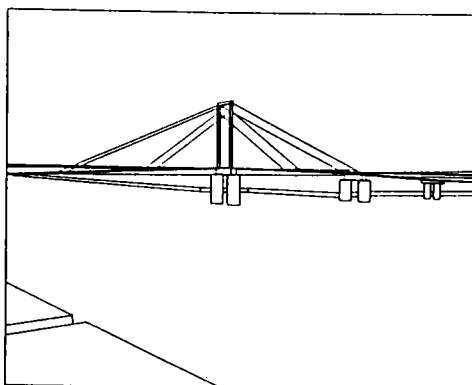
(a)



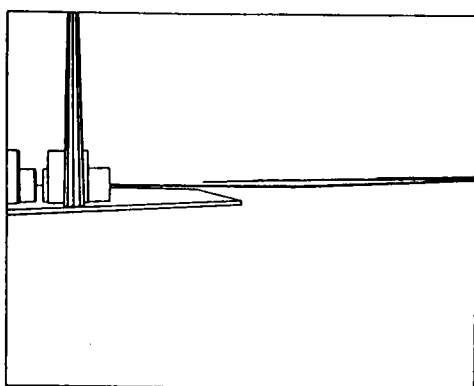
(b)



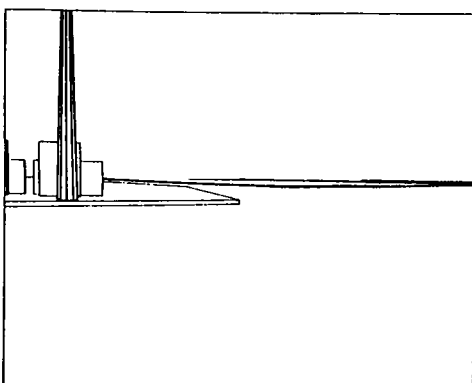
(c)



(d)



(e)



(f)

図-E.9 コンテナ船ブリッジからの視界(位置9)